tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 38 - nr. 4 - 1973

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, Leidschendam. Gironummer 94746 t.n.v.
Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

Het Genootschap stelt zich ten doel in Nederland en de Overzeese Rijksdelen de wetenschappelijke ontwikkeling en de toepassing van de elektronica en de radio in de ruimste zin te bevorderen.

Bestuur

Prof.Dr.Ir. J. Davidse, voorzitter
Ir. F. de Jager, vice-voorzitter
Ir. C. van Schooneveld, secretaris
Ir. L.R. Bourgonjon, penningmeester
Ir. E. Goldbohm
Prof.Dr. H. Groendijk
Ir. G.L. Reijns
Prof.Ir. C. Rodenburg
J.W.A. van der Scheer Ing.

Lidmaatschap

Voor opgave lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat -behoudens ballotage- open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt.

Studenten aan universiteiten en hogescholen kunnen bij gevorderde studie in aanmerking komen voor een juniorlidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie voor gewone leden. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Toestemming tot overnemen van artikelen of delen daarvan kan uitsluitend worden gegeven door de redactiecommissie.

Redactiecommissie

Ir. M. Steffelaar, voorzitter
Ir. L.D.J. Eggermont
Ir. A. da Silva Curiel.

Abonnementen

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt ƒ 35,-. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Advertenties

Tarieven en verdere inlichtingen worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

DE EXAMENS

De examens door het Genootschap ingesteld en afgenomen zijn:

a. op lager technisch niveau: "Elektronica monteur NERG"
b. op middelbaar technisch niveau^x : Middelbaar Elektronica Technicus NERG"
x. Voor het oude examen "Elektronica Technicus NERG" kan volgens de beeindigingsregeling nog slechts tot en met 1975 worden ingeschreven.

Eisen en reglementen

De brochures waarin de exameneisen en het examenreglement zijn opgenomen kunnen schriftelijk worden aangevraagd bij de Administratie van de Examencommissie.

Examencommissie

Ir. J.H. Geels, voorzitter
Ir. F.F.Th. van Odenhoven, vice-voorzitter
Ir. L.R.M. Vos de Wael, secretaris penningmeester.

Deelname en inlichtingen

Voor deelname en inlichtingen wende men zich tot de Administratie van de Examencommissie NERG, von Geusaustraat 151, Voorburg, gironummer 6322 te Voorburg.

GEODETISCHE PLAATSBEPALING IN DE RUIMTE

Ir. J.C. de Munck
Onderafdeling Geodesie, T.H. Delft

Geodetic measurements in space

A survey is given of the different possibilities of geodetic measurements using stars and artificial satellites. Measurements of directions, distances and differences between distances are discussed in a principal way. Methods of astronomical geodesy are mentioned and also the measuring of distances to artificial satellites, doppler tracking of satellites, very long base line interferometry, and height measurements from artificial satellites.
Also the purpose of the measurements is discussed in short.

INLEIDING

De geodesie heeft als primaire taak het bepalen van de vorm en afmetingen van de aarde. Deze opgave is zeer nauw gekoppeld met de bepaling van het zwaartekrachtveld, zoals ook uit dit artikel zal blijken. In de klassieke geodesie meet men netwerken van hoeken en afstanden tussen punten op de aarde. De afstanden tussen deze punten zijn meestal niet veel groter dan 40 km, omdat men in verband met de bolvorm van de aarde, over grotere afstanden meestal geen vrij zicht heeft. Indien men gehele kontinenten wil opmeten of de hele aarde, dan zal het zeer grote aantal betrekkelijk korte zijden een grote opstapeling van fouten geven. Bovendien is het op deze manier niet mogelijk om de oceanen te overbruggen. Daarom maakt men gebruik van buitenaardse voorwerpen die men, al dan niet gelijktijdig, kan aanmeten vanaf ver uit elkaar liggende punten om geodetische betrekkingen tussen deze laatste punten te vinden. In de volgende paragrafen zal een aantal van zulke meetmethoden besproken worden.

RICHTINGSMETING

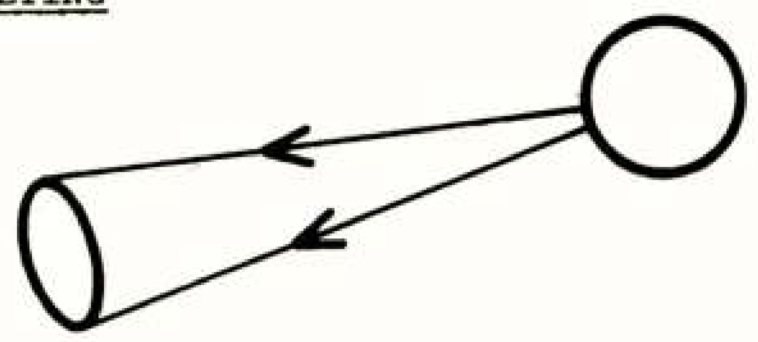


Fig. 1. Richtingsmeting

Van oudsher gebruikt men in de geodesie, en ook in de zeevaartkunde de sterren voor de bepaling van de geografische lengte en breedte. Zie Müller 1969. Nauwkeuriger gezegd: men bepaalt in verschillende, ver van elkaar gelegen punten de richting van de lokale vertikaal ten opzichte van de sterren, en vindt zo de hoeken tussen deze vertikalen. Omdat men gewoonlijk niet simultaan meet, moet men de stand van de aarde - vooral de dagelijkse rotatie - goed kennen. Deze stand kan men berekenen uit de waargenomen tijd (tot op enkele ms nauwkeurig) en uit de gegevens van een groot aantal sterrewachten.

In figuur 1. wordt de richtingsmeting in rudimentaire vorm aangegeven: het optisch stelsel wordt zo gericht dat alle lichtstralen, en meer speciaal de lichtstralen aan de rand een gelijke weglengte hebben afgelegd.

Met deze astronomisch geodetische metingen bereikt men een nauwkeurigheid van ongeveer 2 microradialen. Deze nauwkeurigheid wordt behalve door instrumentele variaties (temperatuur) vooral beperkt door refraktie, dat is de ombuiging van de lichtstralen ten gevolge van het verloop van de dichtheid van de lucht in vertikale richting. Het regelmatige deel van deze refraktie is afhankelijk van de elevatie van de ster en van de brekingsindex van de lucht op de hoogte van het instrument. Deze brekingsindex kan zonder veel moeite bepaald worden. Veel ernstiger zijn de fluctuaties in de refraktie ten gevolge van turbulenties in de atmosfeer, vooral op korte afstand van het instrument.

Een nadere beschouwing leert dat het in verband met de zeer grote afstand naar de sterren niet mogelijk is om met behulp van de geodetische astronomie de vorm van een net van aardse punten te bepalen zonder uitvoerig gebruik te maken van anderssoortige metingen, zoals waterpassing, gravimetrie en driehoeksmeting.

Kunstmanen, die veel dichter bij de aarde staan blijken wel geschikt te zijn voor de vormbepaling van zo'n netwerk. Zie Arnold 1970. De tot nu toe meest gebruikte methode is het meten van de richting naar een kunstmaan gezien vanuit een aards punt. Daartoe wordt de kunstmaan gefotografeerd met de sterren op de achtergrond. Men kent dan de richting van de verbindingslijn station-satelliet in de ruimte. Met deze richtingsmeting, die ook in Delft veel is toegepast, behaalt men

een nauwkeurigheid van 2 tot 5 μrad, die beperkt wordt door de onnauwkeurigheid waarmee de richtingen van de zwakke sterren (tot de 9e magnitude) bekend zijn, door instrumentele beperkingen (zoals filmdeformatie) en door de "differentiële refraktie", dat is het verschil tussen de refraktie van de sterren en van de satelliet. Dit verschil is een orde van grootte kleiner dan de astronomische refraktie van de sterren. De nauwkeurigheid blijft echter beperkt ten gevolge van het kleine aantal satellieten vergeleken met de sterren, en door de hoge hoeksnelheid van de kunstmanen (bij voorbeeld 3,5 mrad/s voor een kunstmaan en 0,05 mrad/s voor een ster). Deze hoeksnelheid beperkt de meetduur en stelt vrij hoge eisen aan de tijdmeting, bij voorbeeld 0,1 milliseconde, aan welke eis overigens zonder te veel moeilijkheden voldaan kan worden.

AFSTANDMETING

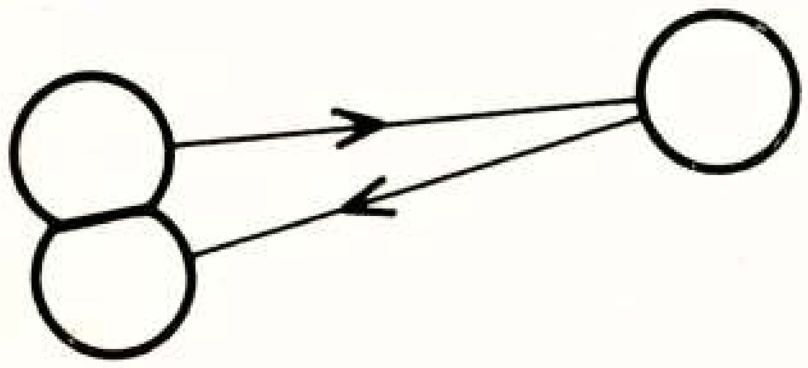


Fig. 2. Afstandmeting met reflektor.

Zeer veel belovend is de afstandmeting naar kunstmanen en naar de echte maan, vooral de afstandmeting met behulp van laserpulsen. Bij deze methode (figuur 2) wordt een korte sterke laserpuls (bij voorbeeld 10 Joule, 1 ns) uitgezonden naar de satelliet, die voorzien is van reflektors. De gereflekteerde lichtpuls wordt ontvangen door een zeer gevoelige detector, meestal een gekoelde fotomultiplikator met als "antenne" een optisch stelsel dat een diameter kan hebben van 50 cm. Deze detector is voorzien van een nauw optisch filter (bij voorbeeld 10 ÅE) om de achtergrondruis te verminderen, zodat ook overdag gemeten kan worden. De opstelling wordt op grond van de voorspellingen van de satelliet gericht met een nauwkeurigheid van bij voorbeeld 0,3 m rad. Ook het tijdstip van uitzenden wordt ingesteld op grond van de satellietvoorspellingen.

De hiervoor genoemde reflektors bestaan uit enige honderden hoekprisma's met een totaal effektief oppervlak in de orde van 1 m^2. Ieder prisma heeft drie spiegelende vlakken loodrecht op elkaar, zodat het licht in tegengestelde richting teruggekaatst wordt. Men kan deze retroprisma's zo goed maken dat de divergentie van de teruggekaatste bundel niet groter is dan 5 à 10 microradialen. In werkelijkheid moeten de reflektoren in de satelliet echter met een veel grotere divergentie gemaakt worden; het licht krijgt namelijk een aberratie in de orde van grootte van 25 μrad doordat de snelheid van de satelliet (ca. 7 km/s) vergelijkbaar is met die van licht.

Met deze methode wordt op het ogenblik een nauwkeurigheid behaald beter dan één meter in de afstand van een station tot een satelliet, terwijl men in de natije toekomst een nauwkeurigheid verwacht van enkele centimeters. Deze nauwkeurigheid zal worden begrensd door instrumentele effecten, door de tijdmeting (eis bij voorbeeld 1 μs), door de "looptijd correctie" en door de kwantenstatistiek.

De looptijd correctie is de correctie P die toegepast moet worden indien de afstand (voorlopig) berekend is met de lichtsnelheid in de vrije ruimte. In getalwaarde vindt men deze P met:

$$P = \int (n-1)ds,$$

waarin ds een elementje van de lichtweg
en n de brekingsindex langs de lichtweg.
De invloed van de kromming van de lichtstralen is zelfs bij centimeternauwkeurigheid te verwaarlozen.

Aangezien de "effektieve dikte" van de atmosfeer 8 km, en de brekingsindex van de lucht op zeeniveau ca. 1,0003 bedraagt, vindt men voor de vertikale richting $3.10^{-4}.8.10^{3} \approx 2,4$ m, en voor een elevatie van 30° ongeveer het dubbele hiervan. Het blijkt niet moeilijk te zijn om deze correctie met een goede nauwkeurigheid te bepalen uit de barometerstand bij het station op aarde.

De derde, wellicht meest fundamentele begrenzing van de nauwkeurigheid speelt een belangrijke rol. Men wil namelijk afstanden meten met een ontvangen puls die slechts twee fotoëlektronen vrijmaakt. Bij metingen naar de maan werkt men zelfs met één fotoëlektron. Indien de ontvangen puls zo sterk is dat vele fotoëlektronen vrijkomen (bij voorbeeld 1000) dan moet men deze puls zorgvuldig analyseren om een cm-nauwkeurigheid te bereiken. Men kan daartoe gebruik maken van meer of minder ingewikkelde pulsdiscriminatoren, die zeer snel moeten zijn. Men kan ook de puls zichtbaar maken op een oscilloscoop en dan fotograferen. Gewoonlijk wordt het gunstig geacht om het zwaartepunt van de intensiteit van de puls te vinden, waarbij alle delen van de puls meegeteld worden en niet alléén de voorflank.
Het is merkwaardig dat de tot nu toe verrichte waarnemingen erop wijzen dat de spreiding van de metingen kleiner is voor pulsen met één - dan voor pulsen met meer fotoëlektronen. Wellicht betekent dit dat de pulsdiscriminatie (bij grote pulsen) nog niet optimaal is.

In plaats van een gepulste laser zou men ook een continu gemoduleerde laser kunnen gebruiken, zoals bij afstandmeting op het aardoppervlak. Zie De Munck (1970) of het boek van Burnside (1971). In dit

geval zal de snel veranderende afstand in de meetopstelling ingevoerd moeten worden op grond van de voorspellingen en eventueel op grond van juist te voren verrichte metingen. Een voordeel van de continue laser is de hogere gevarendrempel die vooral van belang is in verband met overvliegende vliegtuigen.

Voor afstandmeting komen ook radiogolven in aanmerking. Indien men de verschillende faktoren tegen elkaar afweegt dan komt men tot de konklusie dat men ook bij radiogolven met een passieve reflektor in de satelliet zou kunnen werken. Deze faktoren zijn: de divergentie van de reflektor op de grond en van de retro reflektor in de satelliet in verband met hun diameters en de golflengte, en de ruis, die bij radiogolven in beginsel bepaald wordt door de temperatuur (bij 300K is $kT = 4{,}2.10^{-21}$ Joule), terwijl bij licht de ruis bepaald wordt door de frekwentie (bij rood licht van 0,7 μ m is $h\nu = 2{,}9.10^{-19}$ Joule). Ook redelijkerwijs toepasbare gemiddelde zendvermogens moeten vergeleken worden voor mikrogolven en voor licht, en tenslotte kosten, extinctie in de atmosfeer, gevaren, enz.

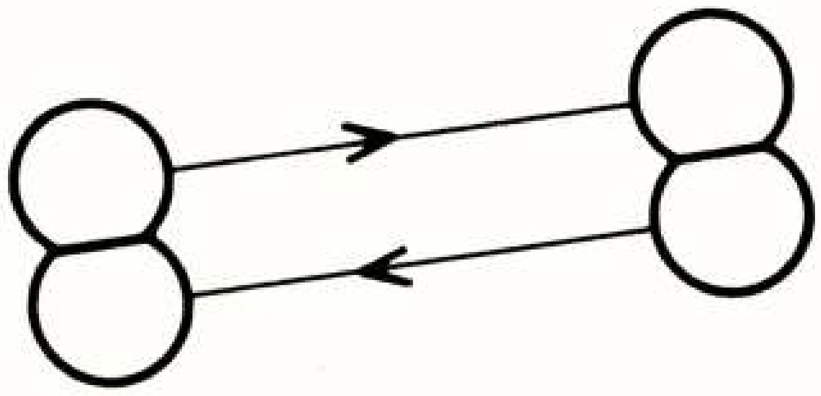


Fig. 3. Afstandmeting met responder.

Gewoonlijk gebruikt men bij radioafstandmeting een "responder" in plaats van een passieve reflektor in de satelliet. Figuur 3. De vanaf het grondstation uitgezonden signalen worden in de satelliet ontvangen en op een iets verschillende draaggolf teruggezonden. Hoewel het niet principieel onmogelijk is om zeer hoge nauwkeurigheden te behalen heeft men met dit systeem tot nu toe niet beter gemeten dan met ca. 10 m nauwkeurigheid.

Radiogolven (mikrogolven) hebben ten opzichte van licht enkele voordelen: het richten is gemakkelijker in verband met de grote divergenties van de bundels. Ook heeft men minder last van nevel en wolken. Een bezwaar van de mikrogolven wordt gevormd door de grote antennes en door de grotere invloed van de waterdamp op de voortplantingssnelheid. Als de frekwentie van de radiogolven niet zeer hoog is (giga hertzen) dan is ook de invloed van de ionosfeer van belang.

<u>AFSTANDVERSCHIL</u>

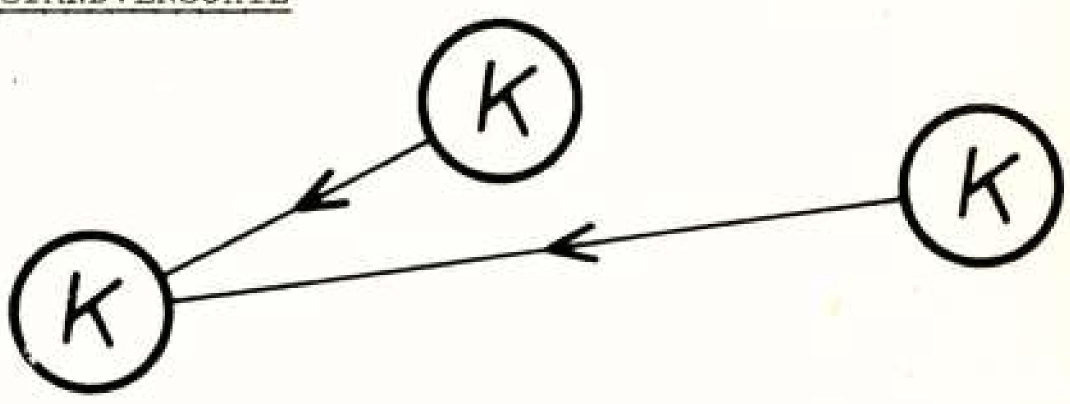


Fig. 4. Afstandverschil, klok in verre station.

Van de meting van afstandverschillen zullen twee gevallen worden onderscheiden: <u>a</u> met een klok in de kunstmaan en <u>b</u> zonder klok in de kunstmaan.

<u>a</u>. Indien de kunstmaan een klok K aan boord heeft, zie figuur 4, dan kan periodiek een pulsvormig signaal uitgezonden worden, bij voorbeeld iedere seconde of iedere minuut. Op het station op aarde kunnen de tijdintervallen gemeten worden tussen de ontvangen signalen. Het verschil $(T_a - T_s)$ tussen een tijdinterval T_a op aarde en het corresponderende tijdinterval T_s in de satelliet is juist gelijk aan het verschil in looptijd $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, waarin θ_1 de looptijd na het begin van T_s en θ_2 de looptijd na het eind van T_s. Als de signaalsnelheid bekend is dan kan uit $\Delta\theta$ het afstandverschil berekend worden. Gewoonlijk zendt de satelliet behalve de genoemde pulsen een signaal uit van een konstante, hoge frekwentie, bij voorbeeld 400 M Hz. De ontvangen frekwentie laat men zweven tegen een lokale oscillator op aarde. De zwevingen worden geteld tussen twee pulsen van de satelliet die dan niet zeer scherp hoeven te zijn. Deze meetmethode is niet anders dan een <u>dopplermethode</u>.

Indien een afstandverschil gemeten zou worden volgens de bovenstaande beschrijving dan zou de nauwkeurigheid in sterke mate beperkt worden door het verschil in de gang (frekwentie) van de klok in de kunstmaan en van die op aarde. Gewoonlijk wordt dit frekwentieverschil geëlimineerd door genoegen te nemen met het verschil van twee opeenvolgende afstandverschillen, waarbij wel aangenomen wordt dat de beide frekwenties konstant zijn.

Een dergelijke dopplermeting wordt in nauwkeurigheid begrensd door instrumentele effekten en door de afwijkingen in de voortplantingssnelheid van de elektromagnetische golven. De troposferische effekten zijn hier boven reeds behandeld. Indien echter radiogolven gebruikt worden, zoals tot nu toe steeds het geval is, dan moet men ook rekening houden met de ionosfeer. Daarvoor kan men gebruik maken van de dipersie in de ionosfeer: men meet op twee of drie draaggolffrekwenties, bijvoorbeeld 400 M Hz en 150 M Hz.

Op het ogenblik kan men op deze wijze met zeer han-

teerbare apparatuur plaats bepalen met een nauwkeurigheid van enkele meters.

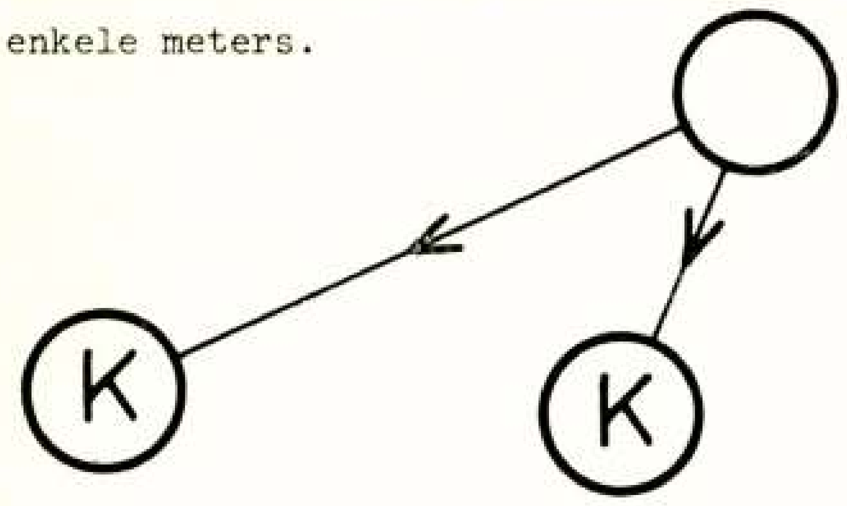


Fig. 5. Afstandverschil, geen klok in verre station

b. Indien zich in het verre station geen klok bevindt dan kan het verschil in afstand gemeten worden van een ver station naar twee aardse stations, figuur 5, welke laatste stations ieder met een klok uitgerust zijn. Hoewel deze methode ook bruikbaar is voor optische bronnen en daarvoor zelfs reeds lange tijd bestaat, is de methode voor geodeten het meest van belang bij gebruik van radiobronnen zoals quasers. Van zo'n natuurlijke radiobron ontvangt men op beide aardse stations de ruis waaruit met behulp van correlatiemetingen het looptijdverschil berekend kan worden. Deze methode is niet anders dan de lange basis interferometrie.

De grootste moeilijkheid bij deze methode is het gelijk lopen van de klokken, die vele duizenden kilometers van elkaar verwijderd kunnen zijn. Dit probleem kan ook hier omzeild worden door verschillen van verschillen te meten, namelijk het verschil van een afstandverschil naar twee radiopuntbronnen.

In verband met de achtergrondruis is het bij de lange basis interferometrie noodzakelijk om met vrij grote radiotelescopen te werken en met grote computers. Voor geodeten nuttige metingen zullen vermoedelijk alleen mogelijk zijn door nauwe samenwerking tussen geodeten en radioastronomen. De samenwerking tussen geodeten en astronomen is overigens niet nieuw.

Het is interessant om de figuren 5 en 1 met elkaar te vergelijken. Men ziet dan een grote overeenkomst. De lange basis interferometrie is niet veel anders dan een richtingsmeting waarbij slechts twee diametrale delen van het objektief gebruikt worden, welke delen zo klein zijn ten opzichte van hun onderlinge afstand, dat deze laatste een essentiële rol speelt in het probleem. Terwijl de richtingsmeting onbenoemde getallen geeft (radialen, graden), vindt men met de lange basis interferometer lengtematen (meters, lichtseconden). Een ander verschil is, dat een lijn door de radiotelescopen niet loodrecht op de ontvangen straling geplaatst wordt. Dit heeft konsekwenties voor de invloed van de refraktie.

GEODETISCHE BEREKENINGEN

Uit het voorgaande blijkt hoe men verschillende elementen voor geodetische berekeningen kan meten, zoals richtingen, afstanden en afstandverschillen. In het algemeen treden echter allerlei parasitaire onbekenden op, zoals de positie van een satelliet en de richting van een radiopuntbron. Bij wijze van voorbeeld zal een aanduiding gegeven worden van de berekening van de vorm van een net van aardse punten uit richtingsmetingen naar kunstmanen.

Men meet bijvoorbeeld in Athene en in Delft simultaan de richting naar een satelliet ten opzichte van de sterren, met behulp van een satellietcamera. Men kent dan de richting van een vlak door Athene, door Delft en door een zeker satellietpositie. Indien men nu nog zo'n simultane meting verricht naar een andere satellietpositie dan kent men de richting van de snijlijn van twee zulke vlakken, dat is de verbindingslijn Athene-Delft. Men kan nu ook zulke simultane metingen doen tussen Riga en Delft en tussen Riga en Athene. Dan kent men de vorm en de oriëntering van de driehoek Athene-Delft-Riga (niet de afmetingen). Zo voortgaande kan men een driehoeksnet opbouwen over de gehele aarde. Een dergelijk wereldwijd net is reeds gemeten en berekend.

De boven beschreven oplossing is zuiver geometrisch; de banen van de satellieten zijn namelijk niet in de berekeningen ingevoerd. Toch weet men veel van de bewegingen van de kunstmanen: zij volgen ongeveer Kepplerbanen. Het is dan ook mogelijk de resultaten te verbeteren door in geschikte mate de baangegevens in te voeren. Indien men deze baangegevens wil gebruiken, is het gewenst satellieten te nemen waarvan deze gegevens zo goed mogelijk bekend (kunnen) zijn. Men maakt daartoe bolvormige satellieten van zeer hoge dichtheid ($20 gr/cm^3$) waarvan het gewicht veel groter is dan de storende krachten zoals van deeltjes en straling van de zon en van kleine restjes atmosfeer.

Nog beter kunstmanen kan men maken door een klein zwaar bolletje in te sluiten in een grote holle bol, die voortdurend zo bijgestuurd wordt dat hij gecentreerd blijft om het kleine bolletje. Dit laatste bolletje is dan geheel afgeschermd tegen de bovengenoemde storingen en wordt alleen beinvloed door de aantrekkingskracht van de aarde en van andere hemellichamen. Men noemt dit een "drag free" satelliet.

Indien de baangegevens van de satelliet in de berekeningen gebruikt worden dan kan men uit de metingen behalve de vorm en afmetingen van de aarde ook gegevens verkrijgen over het zwaartekrachtsveld.

Een speciaal soort metingen dat nog niet genoemd werd, is de hoogtemeting van het zeeoppervlak vanaf een satelliet, een soort echolood met radiogolven. De verticale richting waarin de "loding" hoort te geschieden wordt hierbij bepaald door de "horizontale" zeespiegel binnen de radiobundel. Met behulp van deze metingen hoopt men gegevens te verkrijgen over gemiddelde plaatselijke hoogten van het fisisch zeeoppervlak ten opzichte van de "geoïde", dat is een potentiaalvlak van het zwaartekrachtsveld (theoretisch niveauvlak). Met deze

verschillen die oplopen tot enkele meters, kan men een beter inzicht krijgen in de zeestromingen. De banen van de hiervoor gebruikte kunstmanen moeten zeer goed bekend zijn. Men heeft plannen om deze, bij voorkeur "dragfree", satellieten vast te meten aan een drietal geostabiele satellieten waarvan de onderlinge afstanden voortdurend zeer nauwkeurig gemeten zouden worden. Dit drietal satellieten vormt dan een referentiesysteem.

HET GEBRUIK VAN DE METINGEN

In dit artikel zijn een aantal methoden behandeld van nauwkeurige geodetische metingen over grote afstanden. De vraag, die in principe vooraf had moeten gaan, is: "Waartoe dienen deze metingen?". Het meest juiste antwoord is m.i. het volgende: "Wij zijn met zijn allen in ons hele doen en laten volkomen gebonden aan de aarde. Het is daarom zinvol om die aarde zo goed mogelijk te kennen, en één van de aspecten daarvan is de bepaling van vorm en afmetingen, van veranderingen daarvan, en de bepaling van het zwaartekrachtsveld".

Het is ook goed om objectieve kennis over zulke gegevens te hebben om moeilijkheden van interpretatie te voorkomen. Men vergelijke zaken als normalisatie en definitie van eenheden en ijkmaten, verder landregistratie, enz.

Een meer specifiek probleem waarbij de hier behandelde metingen nuttig kunnen zijn wordt gevormd door de deformaties van de aardkorst, zoals aardse getijden en het uit elkaar drijven van de continenten. Een probleem dat hopelijk op wat kortere termijn opgelost kan worden is het beter voorspellen van aardbevingen uit voorafgaande deformaties van de aardkorst en uit veranderingen in de rotatie van de aarde (de lengte van de dag en de poolbeweging).

Literatuur

K. Arnold - "Methoden der Satellitengeodäsie" (Akad. Verlag, Berlijn, 1970).

C.D. Burnside - "Electromagnetic distance measurement" (Crosby Lockwoord & S., London, 1971).

I.I. Müller - "Spherical and practical astronomy as applied to geodesy" (F. Ungar publ. co., New York, 1969).

J.C. de Munck - "Elektronische afstandmeting in de landmeetkunde" De Ingenieur 82 (1970) p.ET 129.

Voordracht gehouden op 5 juni 1973 tijdens de 230ste werkvergadering in het Delta-hotel te Vlaardingen.

"ARTEMIS": PLAATSBEPALINGSSYSTEEM GEBASEERD OP HET METEN VAN RICHTING EN AFSTAND

Ir. E. Goldbohm en W.B.S.M. Kneefel
Christiaan Huygenslaboratorium B.V.

Several accurate position fixing methods - making use of both optical and radio means - are discussed in an effort to determine a common denominator. It turns out, that an equivalent angular accuracy can be defined for any of the methods discussed, which is valid near the perpendicular middle line of the base line. The accuracy is shown to be proportional to the baseline length expressed in wavelengths.
"Artemis is a position fixing system of the ρ-θ type, making use of 2 stations - a Mobile and a Fix - each fitted with an antenna, which automatically tracks the antenna of the opposite station. The microwave carrier, which is continuously radiated from one station to the other and vice-versa, is used for angular tracking, distance measurement, data transmission and voice communication. The bearing measured at the Fix is in binary form. This data can be transmitted to the Mobile. The distance is measured by transmitting a code from the Mobile to the Fix, which after recognition is detected and retransmitted at another frequency to the Mobile. A clock will determine the average time interval of many measurements (1000), thus providing an improvement in accuracy proportional to $\sqrt{n}$, where n is the number of measurements. The angular accuracy is ± 0,04 grad (2σ), the distance accuracy is ± 1,5 m (2σ).

INLEIDING

Afstandmeting - in sommige toepassingen een op zichzelf staand gewenst gegeven - maakt in vele gevallen deel uit van het meer omvattende probleem van de navigatie in het algemeen, en de nauwkeurige plaatsbepaling in het bijzonder.
In het kader van de huidige serie voordrachten over afstandmeting lijkt het zinvol het verband tussen afstand meting en plaatsbepaling nader te belichten, daarbij ook de hoekmeting te betrekken, en tenslotte enige relaties tussen beiden aan te duiden.

Op aarde hebben wij tenminste 2 (variabele) meetgegevens t.o.v. een referentiesysteem nodig om de gemeten plaats in dit referentiesysteem vast te leggen. Zulke gegevens kunnen zijn: 2 gemeten afstanden (ρ) van het te meten punt (plaats) tot de uiteinden van een bekende basislijn - men noemt dit trilateratie - of: 2 hoeken (θ) gemeten vanuit de uiteinden van en ingesloten met een bekende basislijn naar het te meten punt - men noemt dit triangulatie. Alternatief kunnen wij ook een hoek t.o.v. een bekende referentierichting meten en een afstand van het te meten punt tot een bekend basispunt - men noemt dit een meting in polaire coördinaten.
Triangulatie is vele jaren het middel bij uitstek geweest om nauwkeurig plaats te bepalen, dank zij de bereikte grote precisie van meetinstrumenten, zoals de theodoliet.

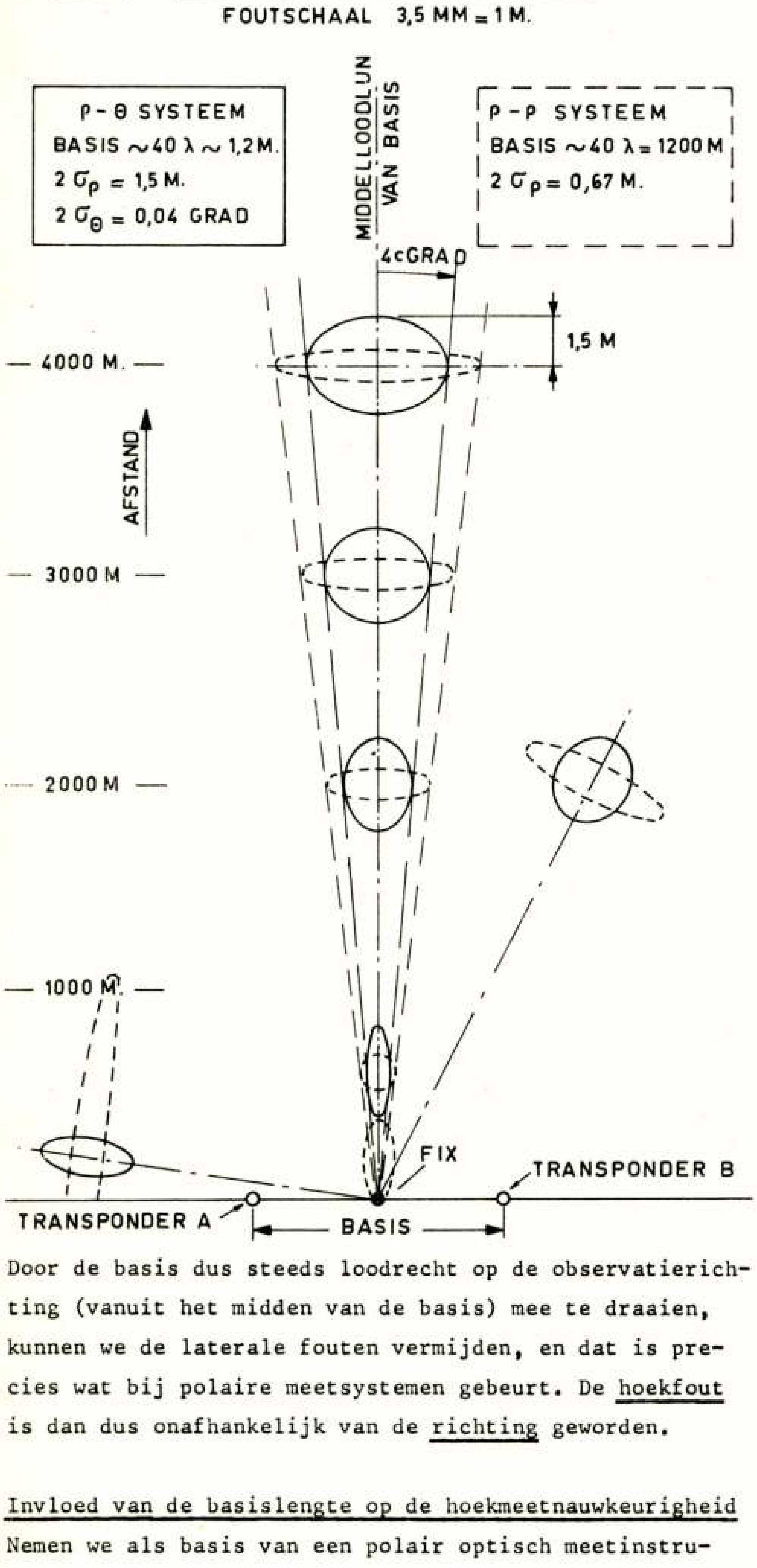
Gezien de beperkingen opgelegd door zichtomstandigheden (enerzijds opstellingshoogte in verband met de horizon, anderzijds de onrust in de atmosfeer, regen, mist etc.) was het normaal niet mogelijk grote afstanden in één maal te meten. Te land werd deze moeilijkheid opgelost door het opbouwen van een z.g. driehoeksnet, ter zee is dit niet goed realiseerbaar en blijven de afstanden beperkt tot ca. 5 km. De snelle ontwikkeling van de electronica heeft in dit manco sinds de laatste oorlog op bevredigende wijze kunnen voorzien, en een aantal meettechnieken gebracht, waarmee vrij grote tot zeer grote afstanden zeer nauwkeurig kunnen worden gemeten. Door gebruik van radiogolven kan de invloed van de atmosfeer op de meetnauwkeurigheid aanzienlijk gereduceerd worden - slechts bij zeer nauwkeurige metingen en/of grote afstanden op aarde moet haar invloed verdisconteerd worden. Bij interplanetaire metingen is ook deze invloed vrijwel geëlimineerd en wordt de precisie slechts begrensd door de nauwkeurigheid waarmee C de voortplantingssnelheid van radiogolven bekend is.

Evenals bij triangulatie de onzekerheid in de plaatsbepaling samenhangt met de vorm van de driehoek, is dat ook bij trilateratie het geval. Om optimale resultaten te krijgen moeten in het laatste geval de beide gemeten afstandlijnstukken elkaar op de gemeten plaats loodrecht snijden. De onzekerheid is dus een functie van de ligging van het gemeten punt t.o.v. de basislijn. In fig. 1 zien wij, dat de foutenellips, op de middelloodlijn van de basis, met groter wordende afstand een evenredig langere hoofdas (evenwijdig met de basis) krijgt. De andere as daarentegen blijft eerst constant, met afnemende afstand, en neemt dan toe (om een vergelijking met polaire plaatsbepalingssystemen mogelijk te maken, is voor de afstandfout een kleine waarde gekozen (2σ = 0,67 m) terwijl de basis eveneens vrij klein is.)

In laterale richtingen t.o.v. de middelloodlijn, wordt de fout groter; de ellips kantelt. Dit kan worden opgevat als samenhangend met de verandering van de hoek, gezien vanuit het midden van de basis naar het meetpunt

FIG.1 PLAATSBEPALINGSYSTEEM

FOUTSCHAAL 3,5 MM = 1 M.



Door de basis dus steeds loodrecht op de observatierichting (vanuit het midden van de basis) mee te draaien, kunnen we de laterale fouten vermijden, en dat is precies wat bij polaire meetsystemen gebeurt. De hoekfout is dan dus onafhankelijk van de richting geworden.

Invloed van de basislengte op de hoekmeetnauwkeurigheid

Nemen we als basis van een polair optisch meetinstrument - zoals de theodoliet - de diameter van het objectief, dat ruwweg 50.000 golflengten meet, dan blijkt er een relatie te bestaan tussen deze basis en de bereikte nauwkeurigheid, die hier een fractie van een boogseconde kan zijn. "Artemis" gebruikt een automatisch het doel volgende richtantenne, die als basis 40 λ meet, hetgeen een bewezen hoekmeetnauwkeurigheid van beter dan 2 boogminuten mogelijk maakt.

Een navigatie-radar - ook een polair meetsysteem - bereikt deze nauwkeurigheden niet, omdat het doel niet wordt gevolgd maar periodiek wordt afgetast en de doelsinformatie dus discontinue binnenkomt. Vuurleiding radar is in dit opzicht weer vergelijkbaar met "Artemis". Het stuursignaal voor het hoekvolgen wordt hier verkregen door de continue integratie van de ontvangen radarimpulsen (b.v. voor AN/FPS16 met een basis $D/\lambda \approx 60\lambda$ is de hoeknauwkeurigheid 3,5'). Bij "Artemis" wordt echter gebruik gemaakt van een steeds aanwezige draaggolf en kan dus een nog beter resultaat worden verwacht.

Een uit een andere discipline afkomstig polair meetsysteem is VOR-DME, een plaatsbepalingssysteem voor vliegtuigen, dat werkt in de 115 MHz-band. In de meest nauwkeurige uitvoering, de z.g. Doppler VOR, met een antenne basis van 5,2 λ, wordt een hoeknauwkeurigheid van ca. 0,25 grad bereikt. De basis draait hier als het ware electronisch rond.

Los van verfijnde instrumentatie technieken en de bereikte instrumentstabiliteit (electronisch en mechanisch) blijkt dus uit genoemde voorbeelden, dat een duidelijk verband bestaat tussen de basisgrootte uitgedrukt in golflengten en de meetnauwkeurigheid. Behalve voor polaire systemen geldt dit ook voor ρ-ρ systemen en hyperbolische systemen, indien betrokken op de middelloodlijn van de basis. Bij het vergelijken van de basislijnen, dient men erop te letten, dat bij sommige systemen van de draaggolf zelf gebruik wordt gemaakt om afstanden en/of faseverschillen te meten (b.v. Decca, Toran, VOR, Artemis (hoek)), andere systemen daarentegen gebruik maken van gemoduleerde draaggolven, waarbij de draaggolf uitsluitend als informatiedrager dient. Deze categorie kan nog worden onderscheiden naar:

a) impulsmodulatie (b.v. Loran, Radar, Trisponder, RPS en Miniranger van Motorola, Consol en Artemis (afstand)).
b) sinusvormige continue modulatie (b.v. Autotape, Tellurometer, Hydrodist etc.).

De golflengte van de modulatie (of spectrum) is dus maatgevend.

In fig. 1 zijn ook - op dezelfde schaal - de foutenellipsen aangegeven van een polair plaatsbepalingssysteem ("Artemis").

De hoekfouten van ρ-ρ en ρ-θ systemen vertonen dus - op de middelloodlijn van de basis - veel overeenkomst. Hoek- en afstandfouten zijn bij ρ-ρ systemen gekoppeld, bij ρ-θ systemen orthogonaal, en dus ontkoppeld. Voor "Artemis" is als de gemeten afstandfout $2\sigma = 1,5$ m genomen.

Een bijzondere plaats in genoemde reeks instrumenten heeft de theodoliet met afstandmeting, d.m.v. gemoduleerde infrarood of lasergolven, omdat de precisie in hoekmeting hier gecombineerd wordt met de thans bereikbare grote nauwkeurigheid in afstandmeting (Geodimeter, Distomat). Helaas is de toepassing van deze fraaie combinatie gebonden aan goed zicht. Overdag is het bereik,

bij goed zicht, niet veel meer dan 3 km; bij slecht zicht aanzienlijk minder. Het doelvolgen geschiedt niet automatisch en vereist voortdurend nasturing. Een fraai instrument in deze categorie is door het Laboratorium voor Geodesie T.H. Delft ontwikkeld. (Bogaerts 1970).

PRINCIPE VAN ρ-θ METING MET ARTEMIS

De eerste versie van "Artemis" werd enige jaren geleden geleverd aan Rijkswaterstaat, voor het overbrengen van nauwkeurige navigatie-informatie en additionele gegevens - zoals beschikbaar aan boord van de werkschepen - naar de wal d.m.v. televisie (Schimmel 1970).
Het acronym voor "Artemis" luidt in dit geval:
A(utomatisch) R(ichtend) T(elecommunicatie) M(icrogolf) S(ysteem).
De thans te bespreken uitvoering werd meer specifiek voor plaatsbepaling ontwikkeld. Het in het Engels gestelde acronym luidt:
A(utomatic) R(anging) T(heodolite) E(radiating) MI(crowave) S(ignals). (foto fig. 2)



fig. 2

Beide uitvoeringen maken gebruik van een richtantenne op elk station, welke elkaar continu volgen door middel van een servostelsel. De antennes van beide stations staan dus ruimtelijk steeds parallel, de bundel van de ene staat gericht op de andere en vice-versa. De antennebundel is smal in het horizontale vlak (2°) en breed in het verticale vlak (22°). Het volgen geschiedt alleen in azimuth (zie fig. 3).

Als we één station aan de wal opstellen (FIX station) en een geschikte bekende referentie-richting (b.v. kaart noorden) selecteren, kan de richting naar voer- of vaartuig waar zich de MOBILE bevindt steeds met betrekking tot de referentie-richting gemeten worden.

De antenne en het volgen in hoek
De antenne, die in de X-band werkt, is van het sleufstralertype, en werkt volgens het z.g. fasevergelijkend

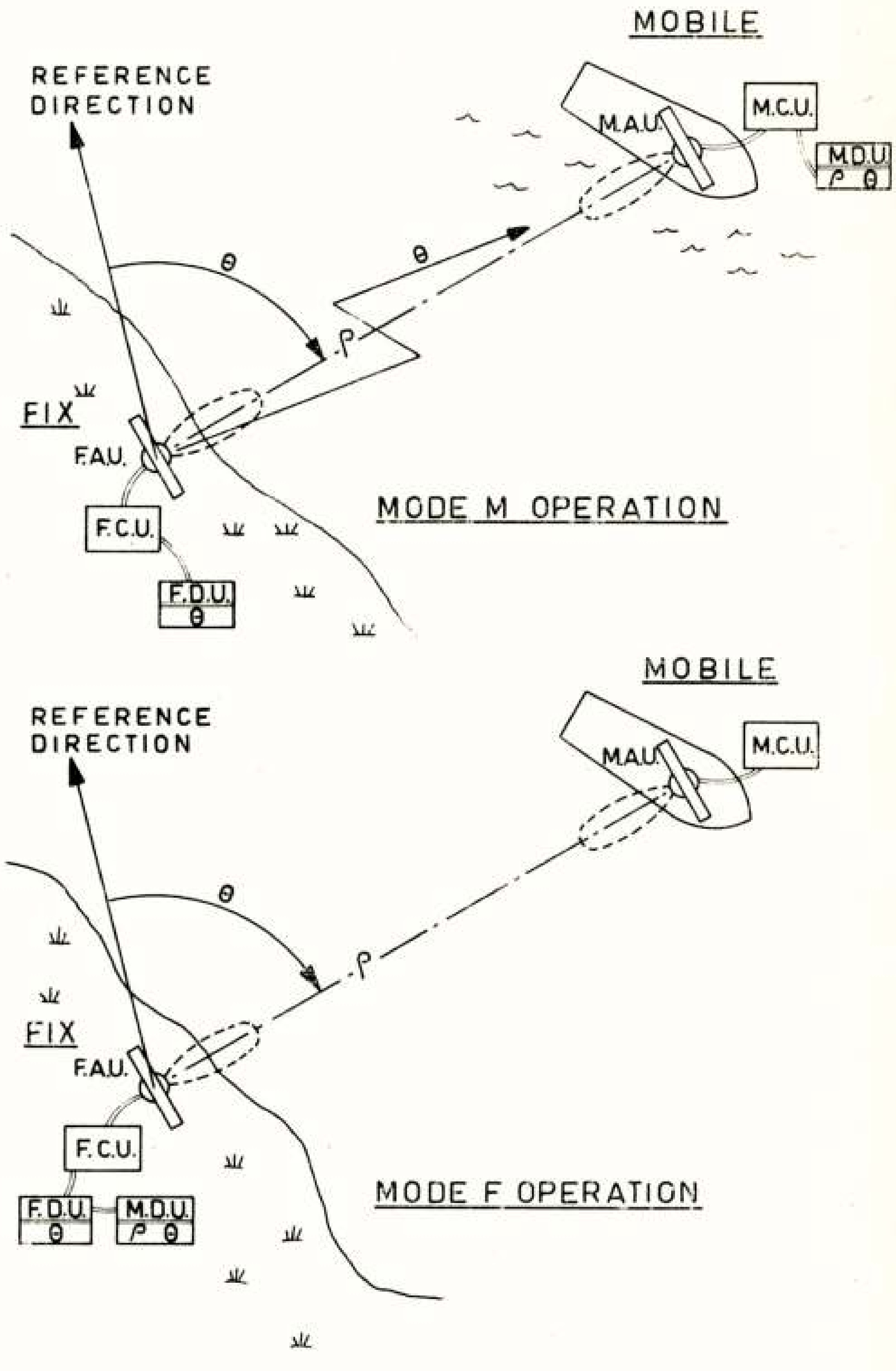


FIG. 3

monopulse principe. Uit een vergelijking van een z.g. som- en een verschilsignaal, die elk aan een afzonderlijke uitgang van de antenne beschikbaar komen, wordt een stuursignaal afgeleid voor de servomotor, die de antenne steeds gericht houdt op het tegenstation (Skolnik 1962, Rhodes 1959). Beide signalen worden na menging op de middenfrequentie van 30 MHz onafhankelijk en fasestar versterkt en aan het einde van de keten gecombineerd in een fasegevoelige detector. Een automatische versterkingsregeling (AGC) zorgt er dan voor dat de stuurspanning voor de servo een directe maat - in grootte en teken - is voor de fout in volghoek en dus onafhankelijk is van de signaalsterkte.
Het komt erop neer dat wij steeds het verschil/som quotient bepalen. Een blokschema van de antenne-eenheid (fig. 7) geeft de belangrijkste functies weer.

Terwille van de eenvoud dient de micorgolfbron tegelijkertijd als zender en locale oscillator, zodat de beide stations draaggolven uitzenden die 30 MHz verschillen.

Om het automatisch volgen onder dikwijls moeilijke omstandigheden (reflecties uit omgeving en van het wa-

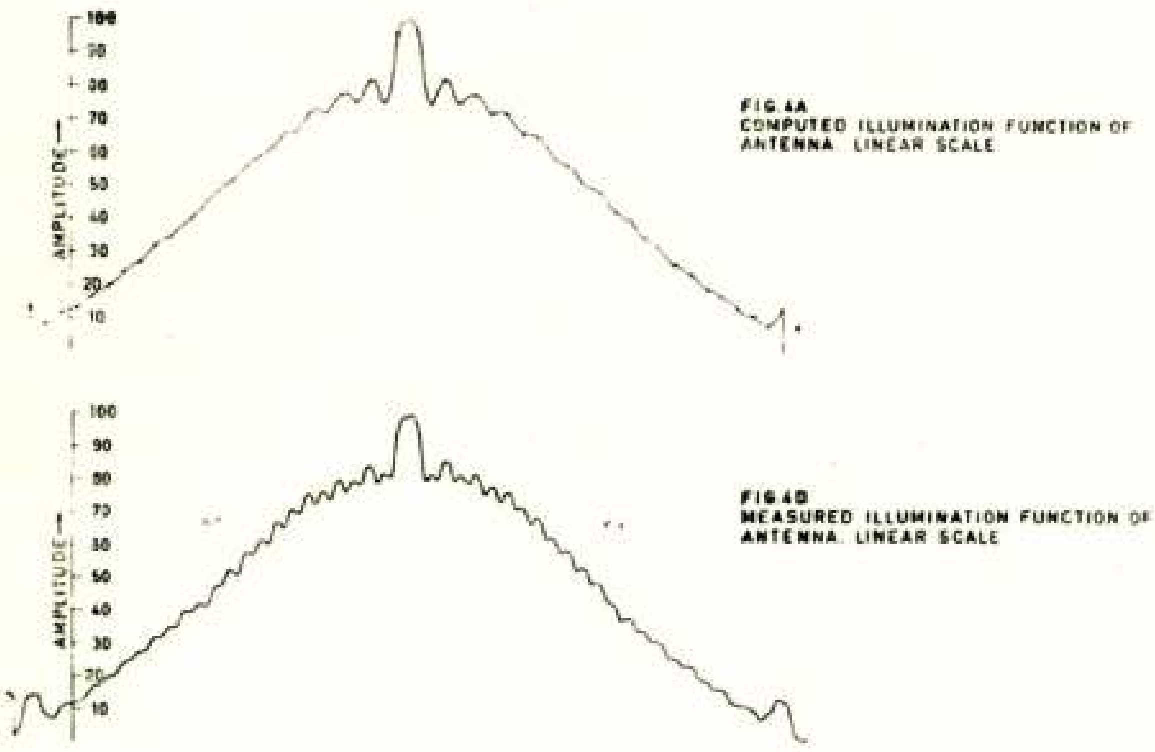


fig. 4

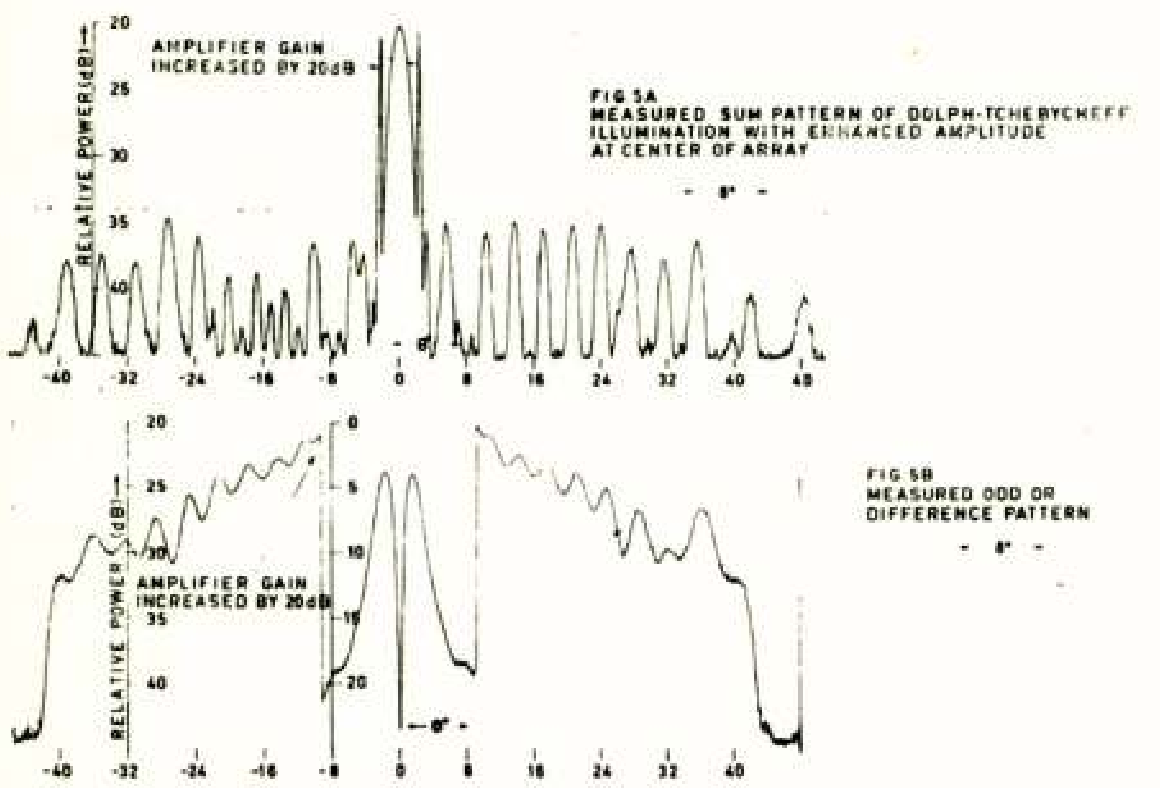


fig. 5

teroppervlak, rollen van het schip enz.) te doen slagen, is bijzondere aandacht vereist t.a.v.:

1) Het bijbundelniveau van de antenne, dat voldoende laag dient te zijn om binnen de practisch voorkomende signaalsterkte variaties geen ontvangst via bijbundels te veroorzaken. Uitgegaan werd van 40 dB bijbundelonderdrukking.
Deze stringente eis wordt veroorzaakt door het feit, dat we hier - anders dan bij radar - met "one way propagation" te doen hebben. Het lage bijbundelniveau geeft tevens bescherming tegen interferentie door de in het algemeen krachtiger radarzenders van schepen en havenradar.
2) De breedte van de antennebundel die zo smal mogelijk dient te zijn bij gegeven antenne-afmeting. Een z.g. Dolph Tchebycheff "verlichting" van de antenne die gekarakteriseerd wordt door het feit dat alle bijbundels even groot zijn, is in dit opzicht optimaal. Het verschilpatroon blijkt dan eveneens een gunstige vorm te bezitten.
3) Het ongewenste volgen van de antenne op bijbundels. Dit is - gezien de automatie - zeer ongewenst. Om dit te voorkomen moeten alle bijbundels dezelfde fase hebben als de hoofdbundel. Dit is voor antennes nogal uitzonderlijk en niet zo eenvoudig te realiseren. Wij hebben dit bereikt door de middensleuven van de antenne een hogere exitatie te geven dan de Dolph Tchebycheff verdeling vereist. Hierdoor worden de bijbundels als het ware opgetild boven de as van het stralingsdiagram, hetgeen overigens 6 dB in bijbundelniveau gaat kosten (fig. 5 en fig. 4).
4) Het energieverbruik van de servomotor, dat gering dient te zijn ook bij snel volgen van de antennes. Dit betekent dat wij de inertie van antenne en servomotor - betrokken op dezelfde as - identiek moeten kiezen. D.w.z. dat de antenne zeer licht en toch ook stijf geconstrueerd moet worden (G = 2 kg).
5) Stijfheid en nauwkeurigheid van de antenne.
De antenne is immers onze meetbasis en de meetnauwkeurigheid kan door onvolkomenheden ongunstig worden beïnvloed.
De motor is zeer klein (size 11) en kan dank zij een krachtig permanent magnetisch veld en een kleine luchtspleet een relatief groot koppel (270 gcm) leveren. Opgenomen vermogen is max. 24 Watt.
6) De speling en rondloopnauwkeurigheid van de tandwieloverbrenging. Bij een overbrengverhouding van 1:1600 wordt geëist dat de speling kleiner is dan 1'.

Meting van azimuth-hoek

De uit het volgen van de FIX-antenne resulterende momentane azimuth-hoek moet continu worden gemeten. Hiervoor gebruiken wij een lineaire absolute optische 15 bits hoek encoder, die 1:1 met de antenne-as gekoppeld is. Het oplossend vermogen is ca. 0,013 grad. De resulterende meetnauwkeurigheid over alles van "Artemis" heeft een 2σ waarde van ± 2' of ± 0,04 grad. (100 grad = rechte hoek). Het uitgangssignaal van de encoder is in binaire code en kan over het datakanaal van de microgolfzender naar het MOBILE station worden overgebracht, en afgebeeld in 5 decimalen. Een BCD (1, 2, 4, 8) uitgang voor de eventuele peripherie-apparatuur is beschikbaar.

Tenslotte nog iets over het instellen van de referentie richting. De klokimpulsen, die worden gebruikt om de afstand te meten, synchroniseren ook het uitlezen van de hoek-encoder. Er is een voorziening gemaakt, dat de klokfrequentie, die normaal in de MOBILE wordt opgewekt, in de FIX wordt gegenereerd als de verbinding zou wegvallen. Hierdoor zijn de hoek-encoder uitlezingen steeds ter beschikking. Het is derhalve zonder meer mogelijk de FIX-antenne met erop gemonteerde richtkijker langs visuele weg uit te richten in een bekende referentierichting (kerktoren, baak, vuurtoren enz.). De dan op het LED display van de FIX afgelezen hoek zal in het algemeen een willekeurige waarde hebben. Deze aflezing kan worden gecorrigeerd tot die van de bekende referentie-richting d.m.v. 5 z.g. duimwielen waarmede elke afgelezen decimaal op de correcte waarde kan worden ge-

bracht. Daarna laten we de FIX-antenne inspelen op de MOBILE tot deze daarop vergrendelt. Het ware azimuth is nu steeds ter beschikking. Het meten van de afstand en de data-overdracht zal in de hierna volgende voordracht worden behandeld. Vermeld zij slechts dat ook de afstand in 5 decimalen op een LED display ter beschikking komt.

OPERATIONELE MODES (zie fig. 3)

"Artemis" kan in 2 operationele modes worden gebruikt, afhankelijk van de gewenste plaats waar de gegevens beschikbaar dienen te komen, t.w.:

M-mode, waarbij de afstandmeting (ρ) aan boord van de MOBILE wordt geïnitieerd en verkregen. De hoek (θ) wordt op de FIX gemeten en in code over het microgolfkanaal naar de MOBILE gezonden. Beide gegevens worden daar getoond op 5-decimalige LED displays. Een "Status" lampje geeft aan of de cijfers betrouwbaar zijn. De apparatuur bestaat zowel voor FIX als MOBILE uit Antenna Unit, Control Unit en Data Unit. (zie foto fig.6).

F-mode, waarbij de afstandmeting op de wal wordt geïnitieerd en getoond. Het resultaat van de hoekmeting is daar al direct beschikbaar, zodat het datakanaal nog vrij is. De MOBILE bestaat uit Antenna Unit en Control Unit, de FIX eveneens uit Antenna Unit en Control Unit en bovendien beide Data Units.

Voor beide modi is in een spraakverbinding over de draaggolf voorzien (F.M.-modulatie). Bij practisch gebruik van "Artemis" kan met voordeel een rekentoestel worden toegepast om de polaire coördinaten om te zetten in een cartesisch of ander coördinatenstelsel. Desgewenst kan aan de rekenaar een plotter en/of een Links/Rechts indicator worden verbonden voor cartografische of navigatiedoeleinden. Een printer kan de gemeten gegevens registreren.

AFSTANDMETING, OVERDRACHT HOEKINFORMATIE

Alvorens de afstandmeting en de overdracht van hoekinformatie te bespreken, zal een korte motivering worden gegeven, waaruit moge blijken waarom betrekkelijk eenvoudige modulatiemethoden voor de afstandmeting en de data transmissie werden gekozen. Met eenvoudige modulatie wordt hier onder meer bedoeld dat beschikbare bandbreedte, tijd en signaal vermogens vanuit een theoretische benadering niet optimaal worden benut. Practische beperkingen worden aan de modulatiemogelijkheden gesteld wanneer we uitgaan van twee belangrijke eisen met betrekking tot de toepassing van het "Artemis"-systeem, nl.:

- in vergelijking met andere systemen een grote flexabiliteit in de opstelling van de beide stations. De aanwezigheid van sterk reflecterende objecten in de directe omgeving mag geen beperking geven in de opstellingskeuze, zolang direct-zicht condities voldoende zijn gewaarborgd.
- in technisch opzicht moet het systeem voldoende marge bieden aan onvoorziene speciale toepassingen, waarbij additionele data transmissie over de bestaande draaggolfverbindingen mogelijk moet zijn. De belangrijkste beperkingen zijn in het volgende aangegeven:



fig. 6. MOBILE APPARATUUR
Control Unit, Data Unit, Printer en Calculator.

a) Terwille van de eenvoud en betrouwbaarheid is elk station uitgerust met slechts één microgolfbron; de middenfrequentie (30 MHz) wordt door onderlinge verschuiving van de microgolffrequentie verkregen. In elk station hebben de uitgezonden draaggolf en het locale mengsignaal dus dezelfde frequentie. Indien de draaggolf vanuit de directe omgeving wordt gereflecteerd, geeft dit hooguit een onbalans op de gebalanceerde mengtrappen; de nauwkeurige hoekservo's worden niet beïnvloed. Een ondubbelzinnige afstandmeting vraagt echter enige modulatiebandbreedte, maar bij reflectie van een gemoduleerde draaggolf kunnen mengprodukten ontstaan welke binnen de doorlaatband van de m.f.-versterkers vallen, en als zodanig de betreffende hoekservo verstoren.
b) Indien men een eenvoudige microgolfbron tegelijkertijd als zender en locale meng-oscillator gebruikt, en de toepassing van gecompliceerde demodulatoren wil vermijden, dan is het in de tijd samenvallen van modulaties op de inkomende draaggolf en op de uitgaande draaggolf c.q. locale mengsignaal, ongewenst.

Op grond van het voorgaande worden de benodigde modulaties zoveel mogelijk in de tijd beperkt, zodat aan de eisen t.a.v. laag zijband vermogen t.o.v. de draaggolf, het niet samenvallen van signalen en de mogelijkheid van toevoeging van extra modulaties kan worden voldaan. In het volgende zal het systeem in de z.g. M-mode worden besproken, omdat hierin naast de afstandbepaling

vanuit de MOBILE, de hoekinformatie van de FIX naar de MOBILE moet worden overgedragen.

Afstandmeetmodulatie en hoekdata modulatie

In fig. 8 zijn deze signalen, zoals zij bij de MOBILE worden uitgezonden en ontvangen, schematisch weergegeven. De feitelijke afstandmeting is betrekkelijk eenvoudig; in de MOBILE wordt de uitgezonden draaggolf kortstondig onderdrukt, hetgeen na ontvangst door de FIX op gelijke wijze wordt beantwoord. Van de achterflanken van de uitgezonden en ontvangen modulatie wordt het meetsignaal m(t) afgeleid. Het signaal m(t) is na compensatie voor de interne systeemvertraging representatief voor de afstand tussen beide stations. De meting wordt met een frequentie van 5 KHz herhaald. Deze afstandmeetmodulatie wordt in beide stations verkregen met snelle PIN diode modulators. In de FIX wordt aan de afstandmodulatie een bit in F.M. van de hoekinformatie toegevoegd. De drempelniveaus voor de detectie-circuits worden van de practisch continu aanwezige draaggolfsignalen afgeleid. Het is belangrijk de relatieve drempelwaarden goed constant te houden, omdat de signaalflanken (∿50 nsec) achter de A.M. detectoren niet zo steil zijn als Fig.8 suggereert. Het zijbandvermogen is gering t.o.v. het draaggolf vermogen, en de hoekservo's worden bij sterke reflecties nagenoeg niet gestoord. Ten aanzien van de afstandcircuits zouden sterke reflecties uit de directe omgeving wel degelijk moeilijkheden kunnen geven. In de MOBILE zou een storende reflectie vroegtijdige beëindiging van het meetsignaal kunnen veroorzaken. In de FIX zijn de ontvangen en uitgezonden meetmodulaties t.b.v. de meetnauwkeurigheid bijna direct gekoppeld, waardoor reflecties regeneratief kunnen werken. Genoemde moeilijkheden zijn in de MOBILE eenvoudig te elimineren door de afstandcircuits gedurende het uitzenden en korte tijd daarna te blokkeren. In de FIX is een dergelijke signaal blokkering niet zonder meer mogelijk. Daarom wordt in de MOBILE aan de meetmodulatie een kenmerk toegevoegd; de FIX reageert pas nadat het kenmerk als zodanig is herkend. In de kenmerk decoder worden de vereiste detector blokkeerpulsen van het kenmerk afgeleid. Fig. 9 geeft de relatie tussen het hoekdisplay en het frame waarin de hoekinformatie wordt overgezonden. Aan elke afstandmeting is 1 hoekinformatiebit gekoppeld; het gehele bericht neemt 0,2 x 32 = 6,4 µsec.

Blokschema van MOBILE en FIX

Het blokschema (fig.10) geeft alleen de schakelingen voor de afstandmeting en de hoekoverdracht. In de MOBILE wordt in de kenmerkgenerator/timing circuits de afstandmeetmodulatie en het meetsignaal m(t) gevormd. D.w.z. het signaal m(t) wordt gestart na een correctie voor de interne systeemvertraging en wordt gestopt vanuit het detector/drempel circuit op de achterflank van de FIX responsie. Het AGC-signaal onderbreekt de uitzending van de afstandmodulatie zodra de binnenkomende draaggolf te zwak, en dus de S/N-verhouding te laag is om een betrouwbare afstandmeting te garanderen. Om reeds eerder genoemde redenen worden zowel in de MOBILE als de FIX de drempelniveau's afgeleid van de practisch continu aanwezige draaggolfsignalen. De kenmerk decoder in de FIX is niets anders dan een schuifregister waarmede het inkomende signaal doorlopend op "kenmerkvoorwaarden" wordt onderzocht. Zodra het kenmerk is herkend, wordt het stuursignaal voor de PIN-modulator doorgelaten. De verbinding van de kenmerkdecoder naar het detector/drempelcircuit blokkeert gedurende ca. 1,5 µsec. het uitgangssignaal van het drempelcircuit, zodat storingen ten gevolge van reflecties geen toegang krijgen tot de PIN-modulator. Vlak voordat de achterflank van het MOBILE signaal op kan treden, wordt het uitgangssignaal van het drempelcircuit gedurende korte tijd vrijgegeven.

De direct binair 15 bits-uitgang van de, aan de antenne-as gekoppelde, hoek-encoder wordt d.m.v. een binaire "up/down counter", een "binary rate multiplier" en een "BCD-counter" omgezet in "grads" of graden, 5 decade BCD. De up/down counter geeft de mogelijkheid de positieve hoekrichting links of rechts om te kiezen. De correctiehoek vanuit de duimwielen wordt per decade bij de encoderhoek opgeteld; de som wordt teruggevoerd in het θ-register. Vanuit dit register wordt θ in het ritme van de binnenkomende afstand-meetsignalen doorgeschoven naar het modulator stuurcircuit, en daar gecombineerd met de frame-bits en omgezet in een bipolair signaal. Op het display wordt, bij het optisch uitlijnen van de FIX, de juiste hoek ingesteld met behulp van de duimwielen. Bij de MOBILE worden de binnenkomende hoekbits in het θ-register geschoven en parallel doorgegeven naar het θ-display en eventueel randapparatuur of calculator. De bepaling van de afstand, uit het voor de dubbele looptijd representatieve meetsignaal m(t), gebeurt met de bekende techniek van tijdinterval-middeling. De hierbij gebruikte tijdbasis heeft een betrekkelijk lage frequentie; één periode is equivalent voor een afstand van 10 meter. Met het signaal m(t) worden een aantal perioden van het tijdbasissignaal doorgelaten naar een teller zodat de teller na 1 meting de naar boven of naar beneden afgeronde afstand aangeeft in tientallen meters. Of de afronding naar boven of naar beneden plaatsvindt is afhankelijk van de momentele faze van het tijdbasis signaal t.o.v. het niet gekoppelde signaal m(t). Het niet gesynchroniseerd zijn van beide signalen is voor deze techniek essentieel. Omdat de kans op een afronding naar boven evenredig is met de fractie (k) die m(t) langer is dan een geheel aantal tientallen meters, zal men indien de meting vele malen wordt herhaald en de resultaten worden gemiddeld de werkelijke waarde van m(t) benaderen. De meetmethode heeft een standaarddeviatie:

$$\sigma = 10\sqrt{\frac{k(k-1)}{n}} \quad \text{(meters)}$$

d.w.z. voor $k = 0{,}5$ $n = 1000$ metingen

$\sigma = 0{,}15$ meter

In de afstandteller (BCD) wordt het aantal doorgelaten tijdbasis pulsen gesommeerd en in de middelingsteller het aantal pulsen $m(t)$ geteld. Na 1000 metingen wordt de afstandteller uitgelezen. Deling door 1000 en uitlezing is een kwestie van komma plaatsing. Evenals θ wordt ρ weergegeven op het LED-display, en parallel aangeboden aan randapparatuur of calculator.

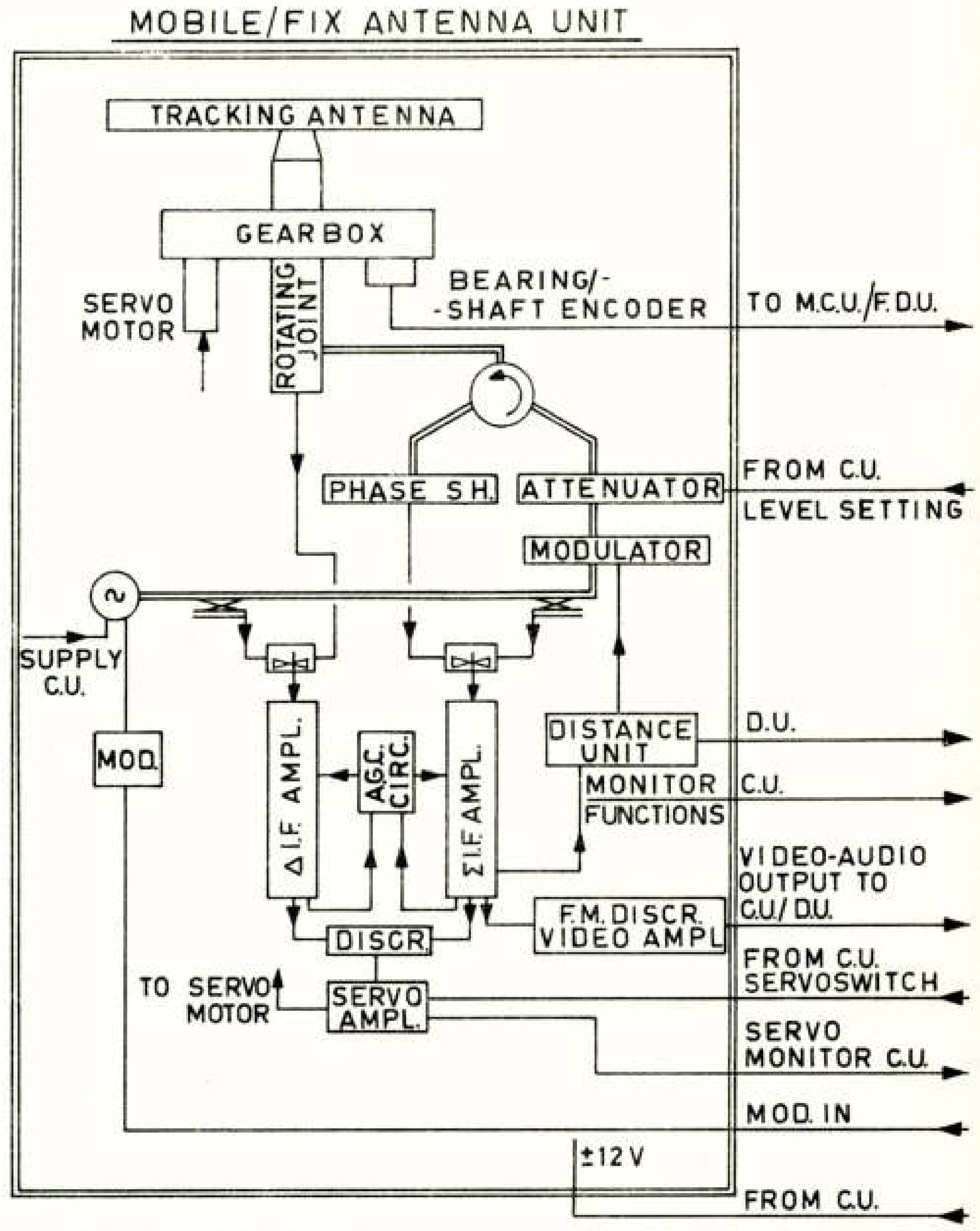
CONCLUSIE

Het plaatsbepalingssysteem "Artemis" meet in polaire coördinaten de positie van een MOBILE station met betrekking tot een FIX station. De hoek wordt verkregen door de momentane stand van de automatisch in hoek volgende microgolfantenne; de afstand door op de draaggolf een kort afstandskenmerk te moduleren en de responsie van het tegenstation te detecteren. Het verlopen tijdsinterval is een maat van de afstand. De gemeten hoek kan worden gerefereerd aan het ware Noorden of aan elke andere gewenste richting. Op grond van dit principe is de hoek zowel als de afstand meetfout onafhankelijk van de afstand en het azimuth beide.

Eén z.g. FIX basisstation is voldoende voor een "fix". De meetgegevens zijn continu ter beschikking. Na uitrichten en vergrendelen van beide stations is inspelen en calibratie niet meer nodig. De FIX geeft steeds een nauwkeurige peiling van de MOBILE antenne aan boord. De gevoeligheid voor interferentie van radarzenders en multipele reflecties van obstakels is zeer gering, o.a. door de uitstekende antenne-eigenschappen. Door toevoeging van randapparatuur kan het areaal van mogelijkheden sterk worden uitgebreid, o.m.:

afstandmelding en afstandbediening, cartografisch tekenen, diepte peilingen, dynamische positiesturing, electronisch ankeren, T.V.-overdracht, ijken van andere plaatsbepalingssystemen.

In Nederland werden door de Rijkswaterstaat, in Zweden door het Bureau Hydrography en in Monaco door het Christiaan Huygenslaboratorium vele metingen verricht en gecontroleerd door landmeters met theodolieten. De standaarddeviatie in hoek was gemiddeld 0,025 grad. De standaarddeviatie in afstand 0,8 m.



C.U.= CONTROL UNIT
D.U.= DATA UNIT
M=MOBILE
F=FIX

FIG.7

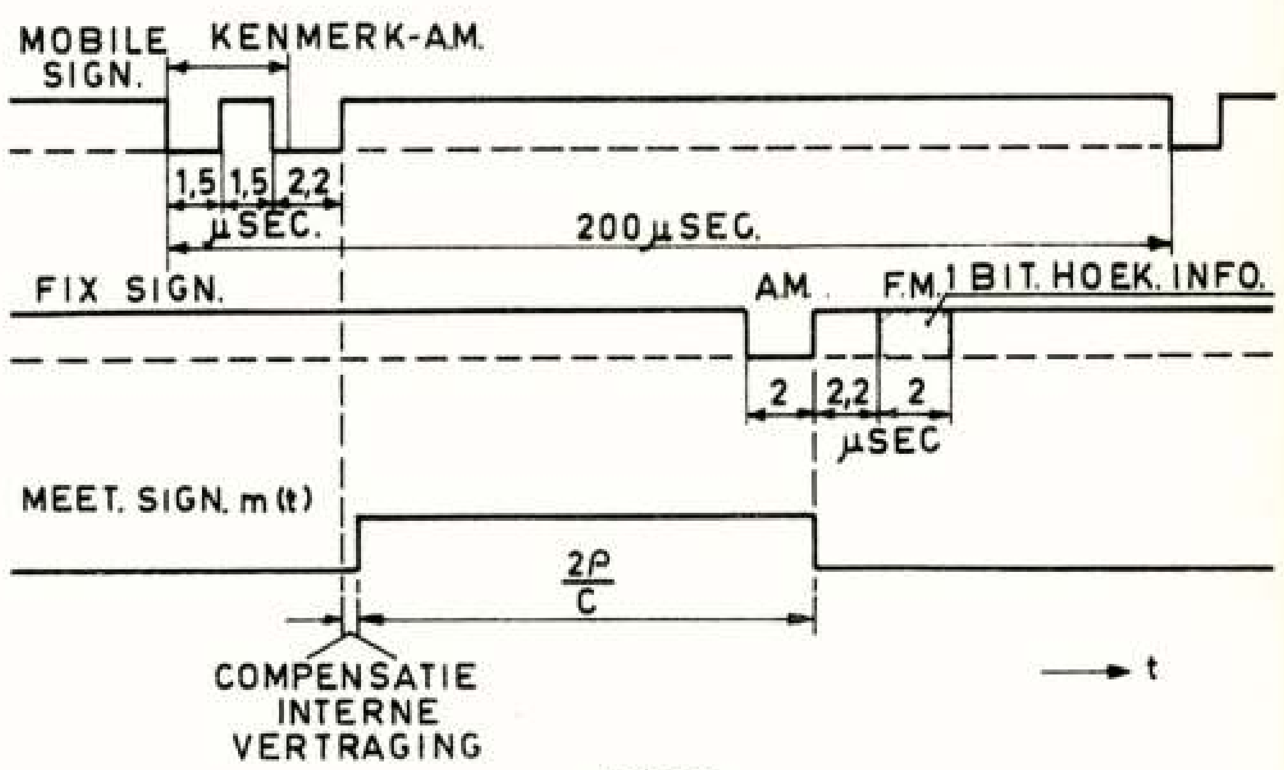


FIG.8

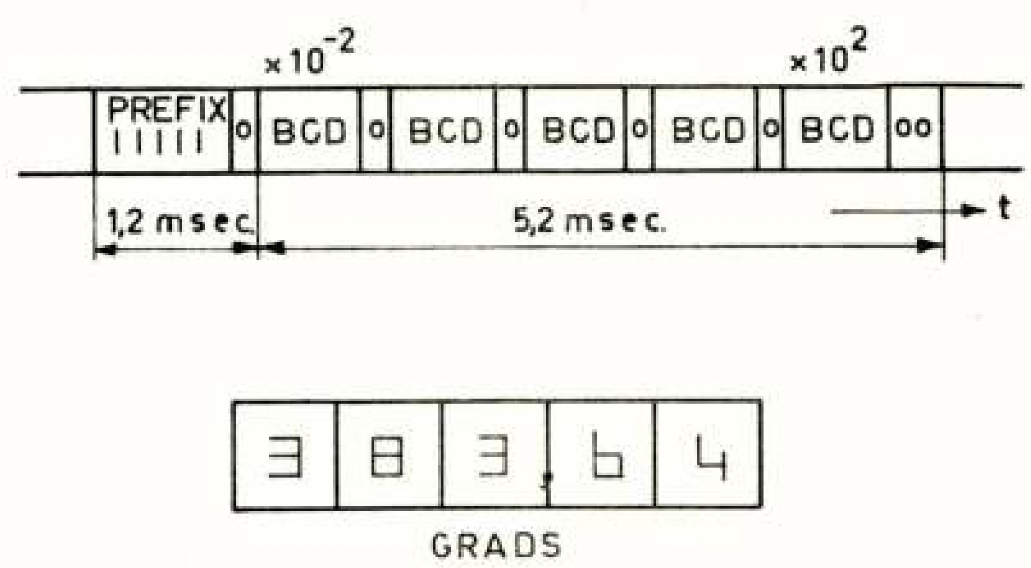


FIG.9

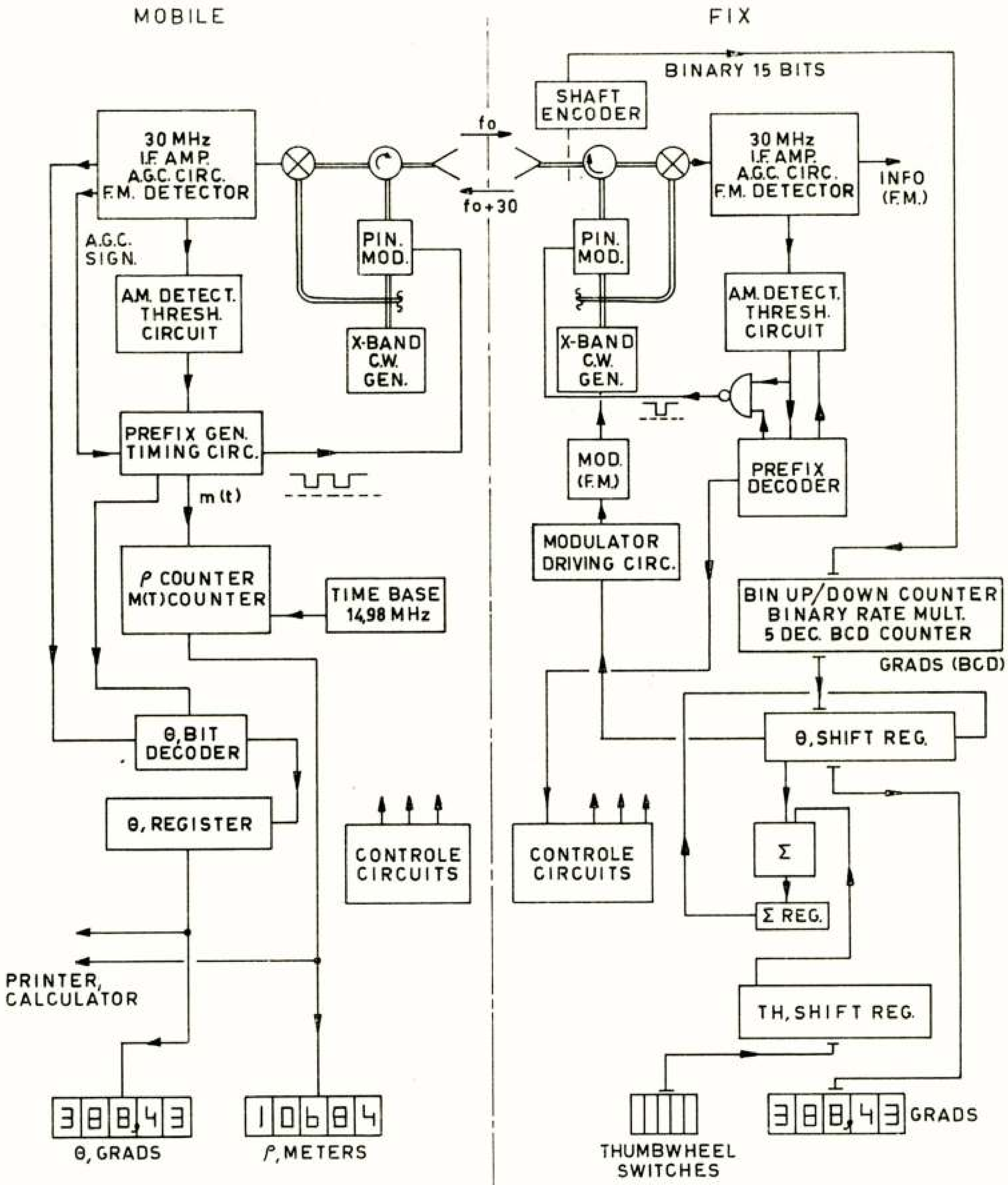


FIG.10

Literatuur

Dr. Ir. Bogaerts M.J.M.
"Automatische registratie in de landmeetkunde"
De Ingenieur E & T. 18 september 1970.
D.R. Rhodes "Introduction to Monopulse" p. 12 e.v.
McGraw-Hill 1959
N. Schimmel De Ingenieur Jaargang 83 no. 19.
M.I. Skolnik "Introduction to Radar Systems"
p. 181 e.v. McGraw-Hill 1962

Voordracht gehouden op 5 juni 1973 tijdens de 230ste werkvergadering in het Delta-hotel te Vlaardingen.

HET PHILIPS OPTISCH-ELEKTRONISCH MEETSYSTEEM VOOR GEREEDSCHAPSWERKTUIGEN

drs H. Renes
Philips HIG-PIT Eindhoven

De werking van het Philips optisch-elektronisch, lineair meetsysteem wordt in grote lijnen verklaard, waarbij enerzijds minder essentiële functies (bijvoorbeeld de alarmeringsschakelingen) ter wille van de overzichtelijkheid onbesproken blijven, terwijl anderzijds interessante schakelingen (fotocel-versterker, interpolator) meer in detail besproken worden.
In het hoofdstuk GRONDSLAGEN worden algemene aspecten van het meetsysteem behandeld. Hierbij worden, op grond van de eisen die het toepassingsgebied stelt, de technologische mogelijkheden en de commerciële argumenten, de specificaties van het meetsysteem opgesteld. Bij de realisatie moet gekozen worden uit een aantal verschillende oplossingen, waarbij blijkt dat enkele keuzecriteria een enigszins arbitrair karakter hebben.
In de hoofdstukken OPTIEK en ELEKTRONICA worden het optische, resp. elektronische deel van het meetsysteem uitgelegd.

1. GRONDSLAGEN

Een lineair meetsysteem bestaat uit drie delen:
1. de lineaire informatie-drager, welke voorzien is van aequidistante merktekens (de liniaal);
2. de opnemer, welke de merktekens waarneemt en hun positie-informatie overdraagt op electrische signalen;
3. de adapter, welke deze signalen bewerkt (interpoleert) en omzet in signalen, die geaccepteerd worden door de indicator of de besturing.

Het Philips optisch-electronisch lineair meetsysteem is speciaal ontwikkeld voor de toepassing van een numerieke indicator of een numerieke besturing op gereedschapswerktuigen. In verband met het nogal ruwe klimaat in de metaal-verspanende werkplaats moet het meetsysteem bestand zijn tegen de invloeden van:
- metalen spanen
- (gietijzer) stof
- koel- en snijvloeistoffen
- smeeroliën
- trillingen
- parasitaire bewegingen loodrecht op de meetrichting
- hoge en lage temperaturen (o.a. tijdens transport)
- sterke electromagnetische storingen

Dit toepassingsgebied stelt bijzondere eisen aan het meetsysteem: het moet robuust zijn, niet aan slijtage onderhevig zijn, geen periodiek onderhoud behoeven en de nauwkeurigheid mag tijdens de levensduur niet verminderen.

Bovendien wordt verlangd dat eventueel binnendringende verontreinigingen het meetsysteem niet kunnen beschadigen en, zo mogelijk, het functioneren niet belemmeren.
Het meetsysteem kan tegen de ongunstige omgeving beschermd worden door het in een hermetisch afgedichte behuizing onder te brengen. Echter door de wrijving in de afdichting ontstaat slijtage, terwijl vooral bij de kleinere machines hysterese in de positionering van de sleden optreedt. Bovendien leert de ervaring dat een lineaire afdichting nooit hermetisch dicht is, waardoor periodieke reiniging van het dikwijls moeilijk bereikbare meetsysteem noodzakelijk wordt.

De groep Numerieke Besturing van de HIG-PIT heeft daarom gekozen voor de alternatieve oplossing: het open, contactloze meetsysteem, waarvan de liniaal en de opnemer volkomen bestand zijn tegen het klimaat van de metaal-verspanende werkplaats, terwijl de vrije afstand tussen de liniaal en de opnemer voldoende groot is om te voorkomen dat eventueel tussen vallende spanen schade kunnen veroorzaken.

Bij de keuze van het fysische principe van het meetsysteem leiden de eisen van contactloos meten en grote vrije afstand tussen liniaal en opnemer tot een optisch meetsysteem.

Onafhankelijk van het fysische principe is er nog de keuze tussen een absoluut meetsysteem, waarbij iedere positie van de opnemer t.o.v. de liniaal een uniek signaal oplevert, en een incrementeel meetsysteem, waarbij een verplaatsing van de opnemer t.o.v. de liniaal een signaal met een periodiek repeterend patroon genereert.

In deze toepassing verdient het incrementele systeem de voorkeur wegens de minder complexe opzet

en dus lagere prijs, terwijl door het treffen van bijzondere voorzorgen de bedrijfszekerheid zeker niet minder is dan die van het absolute meetsysteem.

De liniaal van een incrementeel, optisch, lineair meetsysteem draagt aequidistante, identieke merktekens: een optisch raster. In verband met de aanbouw aan de machine is het reflectieraster geschikter dan het transmissieraster. Op het eerste gezicht lijkt het handig om voor de steek van dit raster het oplossend vermogen van het meetsysteem te kiezen. Bedenkt men echter dat enige jaren geleden reeds een oplossend vermogen van minstens 5 μm werd verlangd, terwijl tegenwoordig 0,5 μm niet exceptioneel is, dan wordt de steek wel erg fijn. Er worden dan zeer hoge eisen gesteld aan de afbeeldingskwaliteit van het objectief, terwijl reeds een dun laagje fijn stof op de liniaal het contrast van het raster ontoelaatbaar kan verminderen.

Er is bovendien nog een zwaar wegend argument tegen een fijne rastersteek. Optische rasters uit één stuk kunnen slechts vervaardigd worden met een maximale lengte van ongeveer 1 meter. Daar de sleden van gereedschapswerktuigen van gemiddelde grootte een slag hebben van 1 à 3 meter (bij de grote portaal-freesmachines kan de slag wel 20 meter of meer zijn) ontstaat dus de noodzaak linialen met een willekeurige lengte samen te stellen door korte standaard-linialen aan elkaar te rijgen. Uit een analyse van het gedrag van het meetsysteem op de overgang van twee liniaaldelen volgt dat de rastersteek moet liggen tussen 0,3 mm en 2 mm. In verband met de eis dat het meetsysteem maten zowel in decimale fracties van de mm als van de inch moet kunnen representeren, is de steek van het raster op 0,635 mm = $\frac{1}{40}$ inch gesteld (de keuze van dit getal wordt later toegelicht).

De opnemer produceert periodiek-analoge, electrische signalen waarvan de periode gelijk is aan de steek van het raster. Een oplossend vermogen van 0,5 μm vereist dus een interpolatie van het analoge signaal met een factor 1270. De ervaring leert dat bij statische signalen de interpolatiefactor niet groter dan 20 kan zijn; een grotere interpolatiefactor is slechts mogelijk bij dynamische signalen.

Tenslotte moet nog vermeld worden dat de technische meter gedefinieerd is als de afstand tussen twee merktekens op een ijzeren staaf. De liniaal bestaat dan ook in principe uit een ijzeren drager waarop het meetraster is aangebracht, dat door een opgelijmd dekglas tegen de omgeving beschermd wordt. Daar de hardheid van glas groter is dan die van metalen spanen, is de liniaal aldus volkomen bestand tegen het klimaat van de metaal-verspanende werkplaats; bij toepassing op slijpmachines moeten echter beschermende maatregelen getroffen worden.

2. OPTIEK

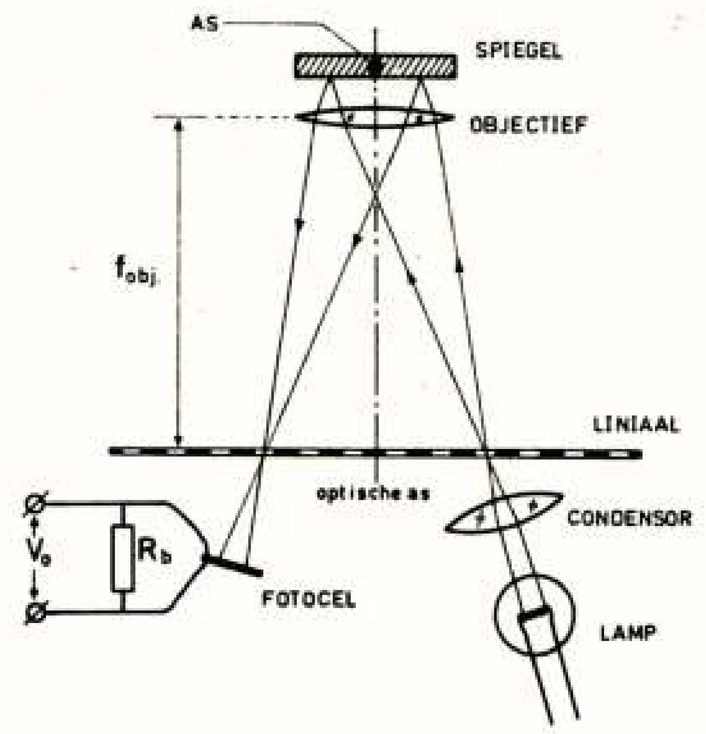
Het optische deel van het meetsysteem wordt gevormd door de liniaal en de opnemer. De beschouwingen in het vorige hoofdstuk voeren tot de volgende (zeer beknopte) specificatie:

liniaal - optisch reflectieraster van het incrementele type
- steek 635 μm

afstand liniaal/opnemer - 14 mm

opnemer - optisch
- dynamische, electrische signalen

Het principe van de opnemer wordt aan de hand van figuur 1 verklaard.

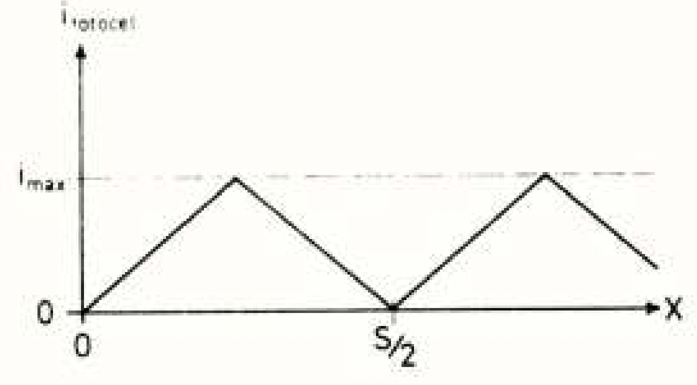


figuur 1

Het transmissieraster (de liniaal) is geplaatst in het hoofdbrandvlak van het objectief waardoor het raster gespiegeld t.o.v. de as van het optische stelsel, bestaande uit objectief en vlakke spiegel, op zichzelf wordt afgebeeld. De lamp verlicht via de condensor een stukje raster rechts van de optische as; de lichtbundel treft na passage van het objectief, reflectie aan de spiegel, nogmaals passage van het objectief het overeenkomstige stukje raster links van de optische as en een deel van de lichtbundel valt tenslotte op de fotocel, die de lichtstroom transformeert in een electrische stroom.

Het is duidelijk dat wanneer het raster (liniaal) naar rechts beweegt, de projectie van het raster naar links zal bewegen en omgekeerd. De fotocel ziet dus twee in tegengestelde richting over elkaar schuivende rasters. Wanneer de zwart-wit verhouding van de lijnenparen van de liniaal juist 1:1 is, varieert de lichtstroom, die op de fotocel valt, lineair van de waarde nul (heldere lijntjes projec-

tie vallen precies op zwarte lijntjes liniaal) tot een maximale waarde (heldere lijntjes projectie vallen precies op doorzichtige lijntjes liniaal). In figuur 2 is de electrische stroom van de fotocel als functie van de positie van de liniaal voorgesteld.

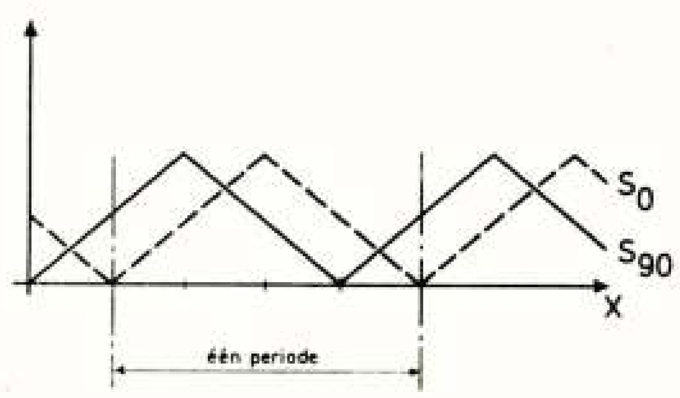


figuur 2

Uit de figuur blijkt direct dat het fotocel-signaal inderdaad een periodiek-analoog signaal is. Een nadere beschouwing brengt twee eigenschappen aan het licht:

a. De periode van het signaal is gelijk aan de halve rastersteek. Dit is een gevolg van de spiegeling van de projectie van het raster t.o.v. de optische as. Wanneer de liniaal zich over een halve steek naar rechts verplaatst, dan verplaatst de projectie zich over een halve steek naar links, dus de relatieve verplaatsing van de projectie is juist één steek. Dit is de z.g. optische interpolatie; de interpolatiefactor is exact gelijk aan 2.

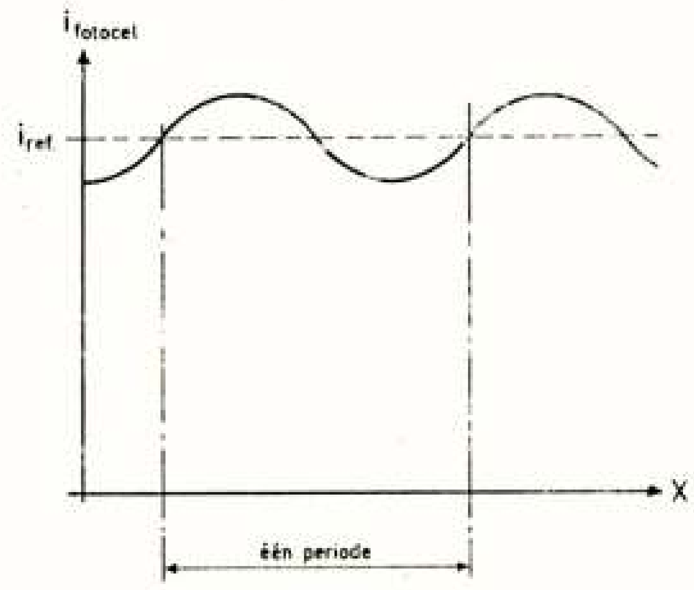
b. Binnen één periode is er een dubbelzinnig verband tussen de amplitude van het fotocel-signaal en de positie van de liniaal; in het algemeen behoren bij één waarde van de fotocel-stroom twee posities van de liniaal. Hierdoor is niet alleen de positie van de liniaal onzeker, maar ook zijn bewegingsrichting. Eén signaal geeft te weinig informatie. Dit is een fundamentele eigenschap van alle incrementele meetsystemen. De oplossing van dit probleem is simpel: laat de opnemer een tweede positie-informatie signaal genereren, bijvoorbeeld een gelijkvormig signaal dat t.o.v. het eerste signaal (bij voorkeur) 90° in fase verschoven is. Zie figuur 3.



figuur 3

Een nadere beschouwing van figuur 3 leert dat het signaal S_{90} 90° voor loopt t.o.v. signaal S_0. Verder blijkt inderdaad dat binnen één periode voor iedere waarde van x één unieke combinatie van S_0 en S_{90} voorkomt. De twee signalen S_0 en S_{90} maken nu een ondubbelzinnige plaats- en richtingsdetectie mogelijk.

Het werkelijke fotocel-signaal verschilt helaas nogal sterk van het ideale driehoeksvormige signaal. Door diverse oorzaken (o.a. afbeeldingsonscherpte) zijn de scherpe kanten van de driehoeken afgerond, waardoor het signaal min of meer sinusvormig is. Bovendien blijkt dit sinusvormige signaal gesuperponeerd te zijn op een sterke, maar variabele gelijkstroom-component, veroorzaakt door de donkerstroom van de fotocel en het z.g. vals licht (strooilicht, omgevingslicht). Zie figuur 4.



figuur 4

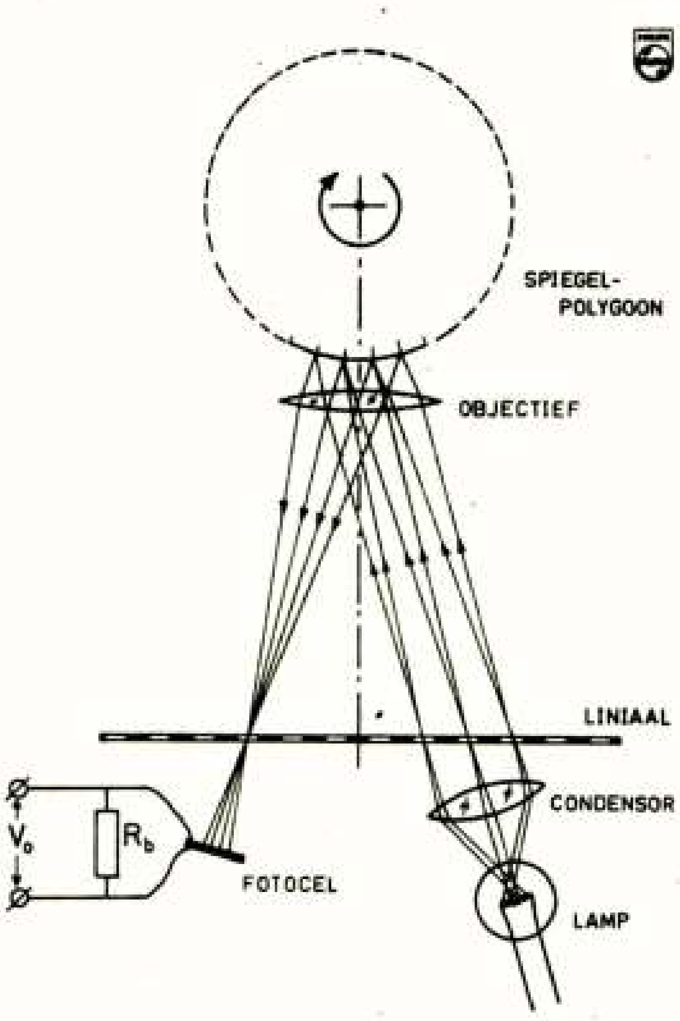
De modulatiediepte van het fotocel-signaal is gering, waardoor de interpolatie zelfs voor kleine interpolatiefactoren al gauw onbetrouwbaar wordt. De oplossing van dit probleem is eliminatie van de niet-constante gelijkstroom-component. Dit is mogelijk wanneer op de plaatsafhankelijke modulatie van het fotocel-signaal een tijdsafhankelijke modulatie gesuperponeerd wordt, zodat ook bij stilstand van de opnemer de fotocel een wisselstroom-signaal produceert.

Beschouw nogmaals figuur 1. Als bij stilstand van de liniaal de vlakke spiegel draait om een as loodrecht op het vlak van tekening, dan zal de projectie van het raster bewegen met een snelheid, die bepaald wordt door de rotatiesnelheid van de spiegel en de brandpuntsafstand van het objectief. Een eventuele snelheid van de liniaal wordt met tegengesteld teken gesuperponeerd op de snelheid van het geprojecteerde raster. Het fotocel-signaal heeft dan altijd een wisselstroomcomponent.

De hoekverdraaiing van de vlakke spiegel is uiteraard beperkt, zodat al spoedig de beweging gestaakt moet worden. De eenvoudigste oplossing is de spiegel een harmonische trilling te laten ondergaan.

Er ontstaat dan echter een sinusvormig fotocelsignaal met een harmonische fase-modulatie. Dit type signaal laat zich moeilijk verwerken, maar het belangrijkste bezwaar is dat het een brede frequentieband heeft, waardoor het niet goed mogelijk is om electromagnetische storingen effectief weg te filteren.

Electronisch aantrekkelijker, maar mechanisch moeilijker te realiseren, is een lineaire fasemodulatie. De continue rotatie van de vlakke spiegel kan bereikt worden door deze te vervangen door een spiegel-polygoon; zie figuur 5.



figuur 5

Door de telecentrische stralengang tussen het objectief en het spiegelpolygoon heeft de translatie van de polygoonfacetten (vlakke spiegeltjes) geen invloed op de afbeelding. De constante rotatie van de facetten zorgt er voor dat de projectie van het raster met een eenparige snelheid voortloopt. De opeenvolgende facetten nemen tijdens de rotatie van het polygoon elkaars taak over. Aangezien deze overname uiteraard geleidelijk moet plaats vinden, wordt de diameter van het objectief zo gekozen, dat tenminste 3 facetten tegelijk aan de beeldvorming bijdragen. Een getrouwe afbeelding van het raster eist dat de rasterprojecties, die via de opeenvolgende facetten worden gevormd, precies op elkaar passen. De eerste voorwaarde hiervoor is dat het raster bestaat uit aequidistante, identieke lijntjes. Aan deze voorwaarde is bij een incrementeel meetsysteem automatisch voldaan. De tweede voorwaarde is dat het aantal facetten van het polygoon en de brandpuntsafstand van het objectief zo gekozen worden, dat zij 'passen' bij de steek van het raster. De betrekking tussen deze drie grootheden wordt gegeven door de formule:

$$\frac{f}{N} = \frac{n.s}{4\pi}$$

Hierin is: f = brandpuntsafstand objectief
N = aantal facetten polygoon
s = steek raster
n = natuurlijk getal (1,2,3,.....)

Het fotocel-signaal heeft na eliminatie van de gelijkstroomcomponent de vorm:

$$F(t) = K.\sin(2\pi\frac{v}{\frac{1}{2}s}t + \varphi(t))$$

Hierin is: v = rastersnelheid
$\varphi(t) = \omega.t$ = lineaire fasemodulatie t.g.v. de rotatie van het spiegelpolygoon
$\frac{1}{2}s$ = halve rastersteek t.g.v. de tweevoudige optische interpolatie

Met behulp van de betrekking $x = v.t$ kan deze formule omgewerkt worden tot:

$$F_1(t) = K_1.\sin(\omega t + 2\pi\frac{x}{\frac{1}{2}s})$$

Het signaal bevat dus een draaggolf met de cirkelfrequentie ω en de positie-informatie x. Eliminatie van de draaggolf en richtingdetectie kan o.a. bereikt worden door de opnemer een tweede fotocel-signaal te laten opwekken, dat de vorm heeft:

$$F_2(t) = K_2.\sin(\omega t - 2\pi\frac{x}{\frac{1}{2}s})$$

Dit signaal ontstaat als de tweede fotocel een geprojecteerd raster ziet, dat in de tegengestelde richting van de eerste projectie voortloopt.

De practische realisatie van deze theoretische beschouwingen is de opnemer LMS-III, waarvan het optisch schema wordt gegeven in figuur 6.

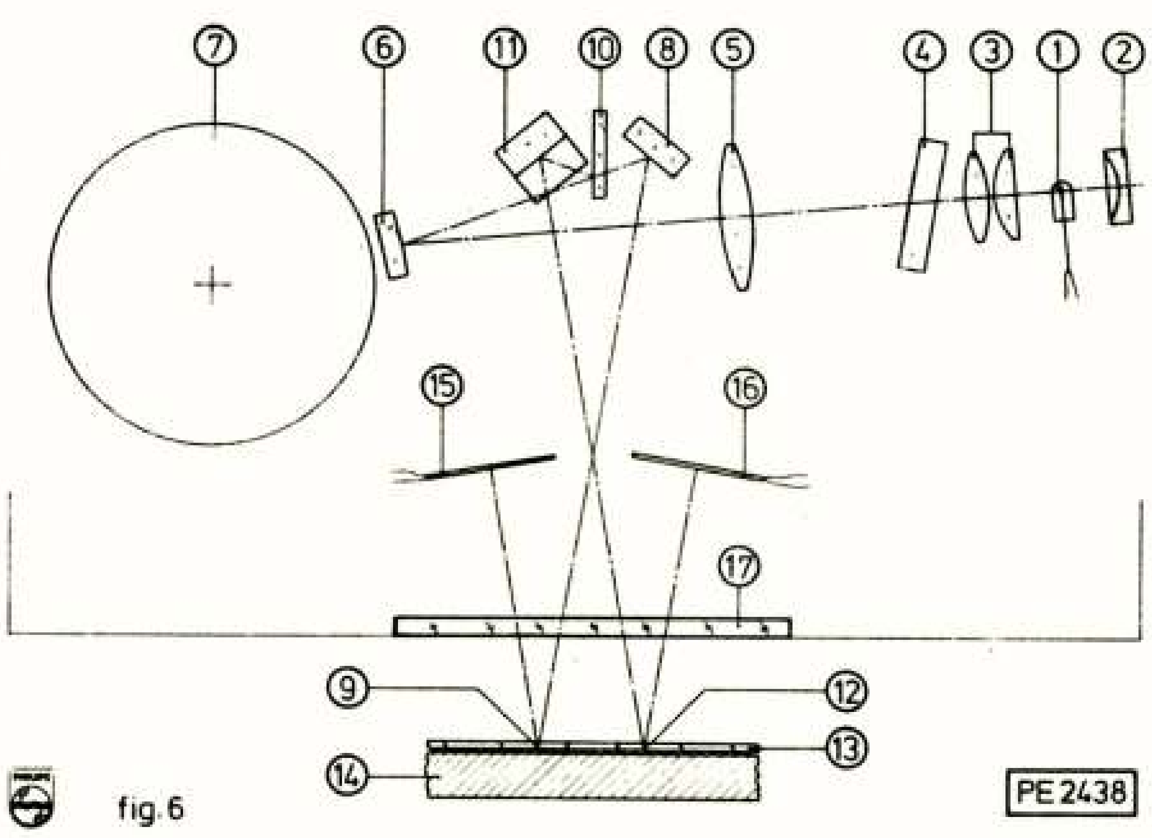


fig.6

De lamp ① is geplaatst in het middelpunt van de holle, sferische spiegel ② en verlicht via de condensor ③ het zendraster ④ . Dit zendraster wordt via de rasterlens ⑤ , het objectief ⑥ , het polygoon ⑦ en de spiegelgroep ⑧ - ⑩ - ⑪ ge-

projecteerd op de gebiedjes ⑨ en ⑫ van het raster. Het gereflecteerde licht valt op de fotocellen ⑮ en ⑯ . De cylinderlens ⑰ concentreert het licht op de fotocellen en doet tevens dienst als venster, maar heeft geen functie bij de afbeelding van het zendraster.

De spiegelgroep bestaat uit de vlakke spiegel ⑧ , de halfdoorlatende spiegel ⑩ , die de lichtbundel in twee gelijke delen splitst, en de hoekspiegel ⑪ , die in het vlak van tekening als vlakke spiegel werkt, maar in het vlak loodrecht op het vlak van tekening de lichtstralen tweemaal reflecteert, waardoor een storing geëlimineerd wordt, die samenhangt met de stand van de lijnen van de liniaal (hierop wordt verder niet ingegaan).

Het raster is aangebracht op de ijzeren drager ⑭ en wordt beschermd door het dekglas ⑬ .

Merk op dat de 2-voudige optische interpolatie van figuur 1 hier niet optreedt. De fotocel-signalen zijn dan ook:

$$F_1 = K_1.\sin(\omega t + 2\pi.\frac{x}{s})$$

$$F_2 = K_2.\sin(\omega t - 2\pi.\frac{x}{s})$$

Het polygoon wordt direct aangedreven door een quasi-synchrone hysterese motor, die rechtstreeks uit het lichtnet gevoed wordt. De draaggolffrequentie is daardoor afhankelijk van de frequentie van het lichtnet:

netfrequentie 50 Hz → f = 16.375 Hz
netfrequentie 60 Hz → f = 19.650 Hz

De maximale verplaatsingssnelheid is gespecificeerd als 48 m/min, en dan geldt

$$2\pi\frac{x}{s} = 2\pi.1260.t$$

De frequentie van de draaggolf wordt door de beweging van de opnemer t.o.v. de liniaal gemoduleerd met een maximale frequentiezwaai van 1260 Hz.

De opnemerkabel transporteert dus signalen, die liggen binnen de smalle frequentieband 15 kHz-21 kHz. Door toepassing van smalle-band filters kan de signaalruisverhouding sterk verbeterd worden, temeer daar de electromagnetische storingen het sterkst zijn in de frequentieband 50 Hz - 1 kHz (de netfrequentie plus zijn hogere harmonischen) en boven de 100 kHz met een breed maximum rond 3 MHz (vonkende schakelaarcontacten en collectors van gelijkstroommotoren).

3. ELECTRONICA

De adapter bevat vrijwel alle electronica van het meetsysteem; in de opnemer zitten slechts twee identieke fotocelstroomversterkers en een ontstoringsfilter.
De adapter ontvangt via de opnemerkabel de versterkte fotocel-signalen:

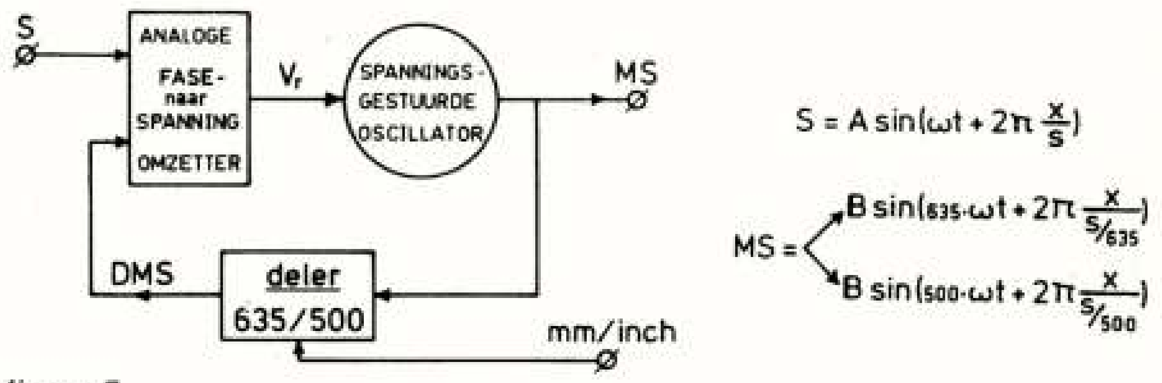
$$S_1 = A.\sin(\omega t + 2\pi\frac{x}{s})$$

$$S_2 = A.\sin(\omega t - 2\pi\frac{x}{s})$$

Nadere beschouwing van deze signalen leert dat bij een verplaatsing in de positieve x-richting het faseverschil tussen S_1 en S_2 toeneemt, terwijl omgekeerd een verplaatsing in de negatieve x-richting een afname van het faseverschil tot gevolg heeft. Detectie van het teken van de verandering van het faseverschil geeft dus de richting van de verplaatsing.

De grootte van de verplaatsing lijkt ook eenvoudig te bepalen door het lineaire verband tussen het faseverschil en x. Dit geldt echter alleen voor zuiver sinusvormige signalen en de opnemersignalen zijn helaas slechts bij benadering sinusvormig. Een verandering van het faseverschil met 2π kan echter wel nauwkeurig vastgesteld worden. Anders gezegd: de adapter meet het faseverschil tussen S_1 en S_2 in incrementen van 2π radialen. De verplaatsing van de opnemer t.o.v. de liniaal wordt dan gemeten in incrementen van $\frac{1}{2}s$ = 0,3175 mm. Dit oplossend vermogen is ontoelaatbaar klein en bovendien geen eenvoudige decimale fractie van de mm (wel van de inch, nl 0,0125 inch).

Het argument van de signalen is omgekeerd evenredig met de rastersteek. Vergroting van het oplossend vermogen door deling van de rastersteek heeft dus een vermenigvuldiging van het argument tot gevolg. Verkleining van de rastersteek is niet toelaatbaar, maar het doel kan ook bereikt worden door de signalen electronisch te vermenigvuldigen; het gewenste oplossend vermogen en de inch-mm conversie zijn eenvoudig instelbaar door de juiste vermenigvuldigingsfactor te kiezen. Figuur 7 geeft het principeschema van deze schakeling:



figuur 7

De spanningsgestuurde oscillator genereert het signaal MS met de nominale frequentie 635 ω of 500 ω , dat door de deler door 635 of 500 gedeeld wordt, zodat het signaal DMS de frequentie ω heeft. De instelling van het deeltal wordt bepaald door de spanning op de lijn 'mm/inch'. De analoge fase-naar-spanning omzetter transformeert het faseverschil tussen DMS en S in een analoge spanning, die de frequentie van de oscillator bijstuurt totdat DMS in de pas loopt met S.

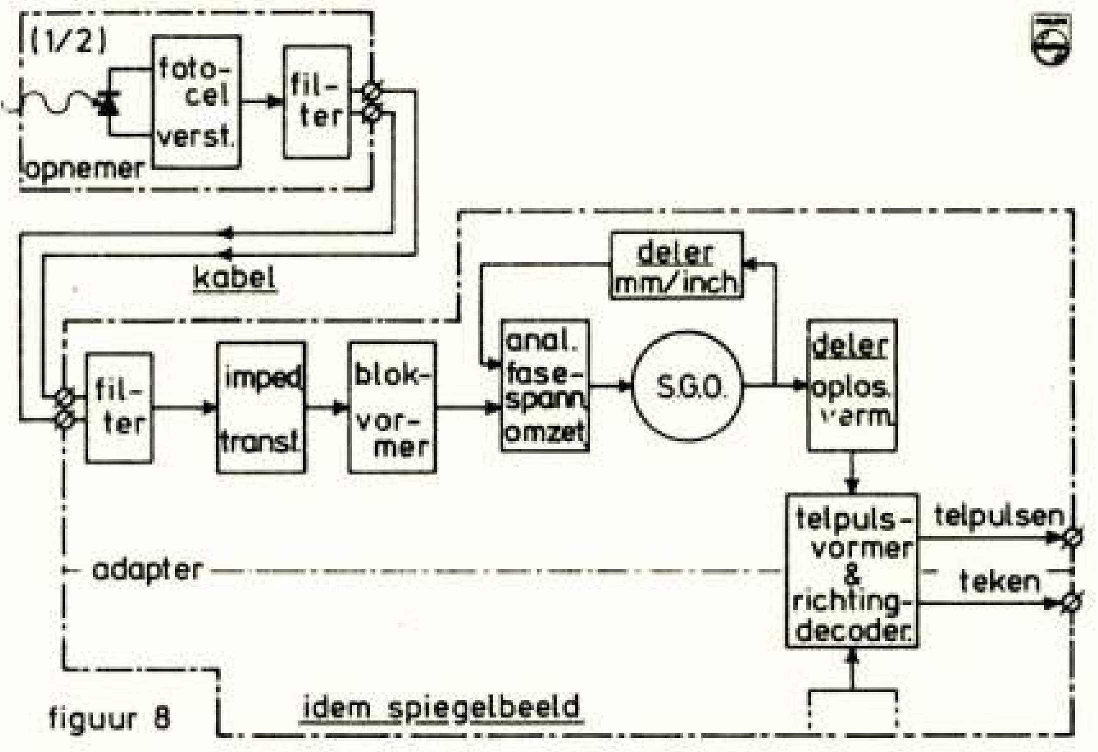
In de stand 'mm' is de schijnbare rastersteek s/635 = 1 µm, dus het oplossend vermogen is 0,5 µm. In de stand 'inch' is de schijnbare rastersteek s/500 = 0,000.05 inch en het oplossend vermogen 0,000.025 inch. Een kleiner oplossend vermogen kan eenvoudig verkregen worden door de frequentie van het signaal MS te delen door een geschikt (geheel) getal, of door een andere vermenigvuldigingsfactor te kiezen. De laatste oplossing eist echter een aanpassing van de oscillator.

De keuze van de rastersteek kan nu nader toegelicht worden. De vermenigvuldigingsfactor mag niet groter zijn dan strikt noodzakelijk is om te voorkomen dat de frequentie van MS te hoog wordt (voor een oplossend vermogen van 0,5 µm is bij een steek van 0,635 mm en een netfrequentie van 60 Hz de nominale frequentie van MS reeds 12,5 MHz!). De interpolatiefactor is in het algemeen een gewone breuk, waarvan de teller de vermenigvuldigingsfactor is en de noemer het getal waardoor de frequentie van MS gedeeld moet worden om het verlangde oplossend vermogen te verkrijgen. De rastersteek moet dus zodanig gekozen worden dat de noemer van de interpolatiefactor zo klein mogelijk is. Bovendien is de regelkring slechts in een smal frequentiegebied stabiel, zodat de twee vermenigvuldigingsfactoren dicht bij elkaar moeten liggen.

Per definitie geldt: 1 inch = 25,4 mm.

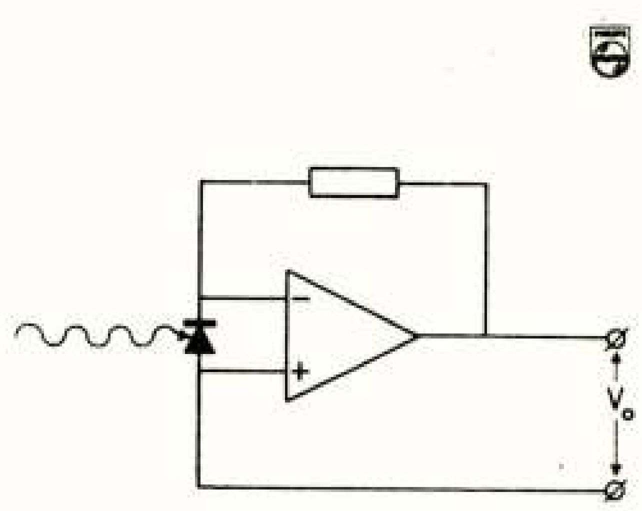
Hieruit volgt dat wanneer de rastersteek een decimale fractie van de mm is, de noemer van de inch-interpolatiefactor tenminste de factor 127 bevat; bij een decimale fractie van de inch komt deze factor in de teller van de mm-interpolatiefactor. De rastersteek moet dus een decimale fractie van de inch zijn en de keus is gevallen op s = 0,025 inch = 0,635 mm.

Figuur 8 toont het blokschema van de electronica. Twee elementen uit deze schakeling worden wat meer gedetailleerd beschreven.



figuur 8

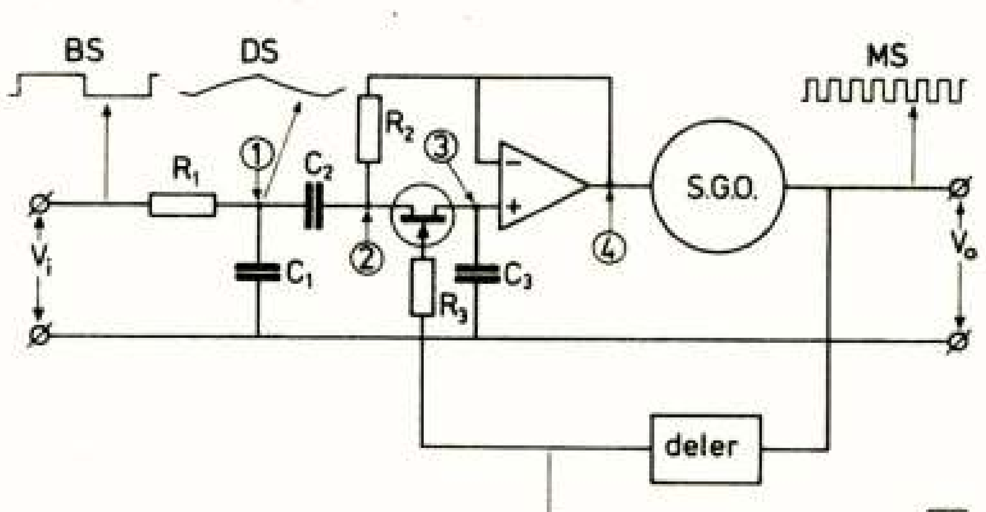
a. De fotocelstroomversterker. De toegepaste Si-fotocellen hebben een groot oppervlak en daardoor ook een grote eigen capaciteit, welke parallel staat aan de belastingsweerstand. De gemoduleerde lichtstroom wordt door de fotocel omgezet in een wisselstroom, waardoor over de belastingsweerstand een wisselspanning ontstaat. De capaciteit vormt echter een kortsluiting voor deze wisselspanning, waardoor de frequentiekarakteristiek reeds bij 1 kHz begint af te vallen. De invloed van de eigen capaciteit kan echter geëlimineerd worden door de fotocel op te nemen in een schakeling die de spanning over de fotocel constant houdt; zie figuur 9.



figuur 9

De terugkoppeling houdt de spanning op de - ingang van de operationele versterker op een constant niveau, waardoor de spanning van de Si-fotodiode constant blijft, ongeacht de geleverde stroom. Bij experimenten bleek de versterkingsfactor van de schakeling tot 300 kHz vrijwel constant te zijn.

b. De synchronisatie van de spanningsgestuurde oscillator (figuur 10)



figuur 10

projecteerd op de gebiedjes (9) en (12) van het raster. Het gereflecteerde licht valt op de fotocellen (15) en (16) . De cylinderlens (17) concentreert het licht op de fotocellen en doet tevens dienst als venster, maar heeft geen functie bij de afbeelding van het zendraster.

De spiegelgroep bestaat uit de vlakke spiegel (8) , de halfdoorlatende spiegel (10) , die de lichtbundel in twee gelijke delen splitst, en de hoekspiegel (11) , die in het vlak van tekening als vlakke spiegel werkt, maar in het vlak loodrecht op het vlak van tekening de lichtstralen tweemaal reflecteert, waardoor een storing geëlimineerd wordt, die samenhangt met de stand van de lijnen van de liniaal (hierop wordt verder niet ingegaan).

Het raster is aangebracht op de ijzeren drager (14) en wordt beschermd door het dekglas (13) .

Merk op dat de 2-voudige optische interpolatie van figuur 1 hier niet optreedt. De fotocel-signalen zijn dan ook:

$$F_1 = K_1.\sin(\omega t + 2\pi.\frac{x}{s})$$

$$F_2 = K_2.\sin(\omega t - 2\pi.\frac{x}{s})$$

Het polygoon wordt direct aangedreven door een quasi-synchrone hysterese motor, die rechtstreeks uit het lichtnet gevoed wordt. De draaggolffrequentie is daardoor afhankelijk van de frequentie van het lichtnet:

netfrequentie 50 Hz ⟶ f = 16.375 Hz
netfrequentie 60 Hz ⟶ f = 19.650 Hz

De maximale verplaatsingssnelheid is gespecificeerd als 48 m/min, en dan geldt

$$2\pi\frac{x}{s} = 2\pi.1260.t$$

De frequentie van de draaggolf wordt door de beweging van de opnemer t.o.v. de liniaal gemoduleerd met een maximale frequentiezwaai van 1260 Hz.

De opnemerkabel transporteert dus signalen, die liggen binnen de smalle frequentieband 15 kHz-21 kHz. Door toepassing van smalle-band filters kan de signaalruisverhouding sterk verbeterd worden, temeer daar de electromagnetische storingen het sterkst zijn in de frequentieband 50 Hz - 1 kHz (de netfrequentie plus zijn hogere harmonischen) en boven de 100 kHz met een breed maximum rond 3 MHz (vonkende schakelaarcontacten en collectors van gelijkstroommotoren).

3. ELECTRONICA

De adapter bevat vrijwel alle electronica van het meetsysteem; in de opnemer zitten slechts twee identieke fotocelstroomversterkers en een ontstoringsfilter.
De adapter ontvangt via de opnemerkabel de versterkte fotocel-signalen:

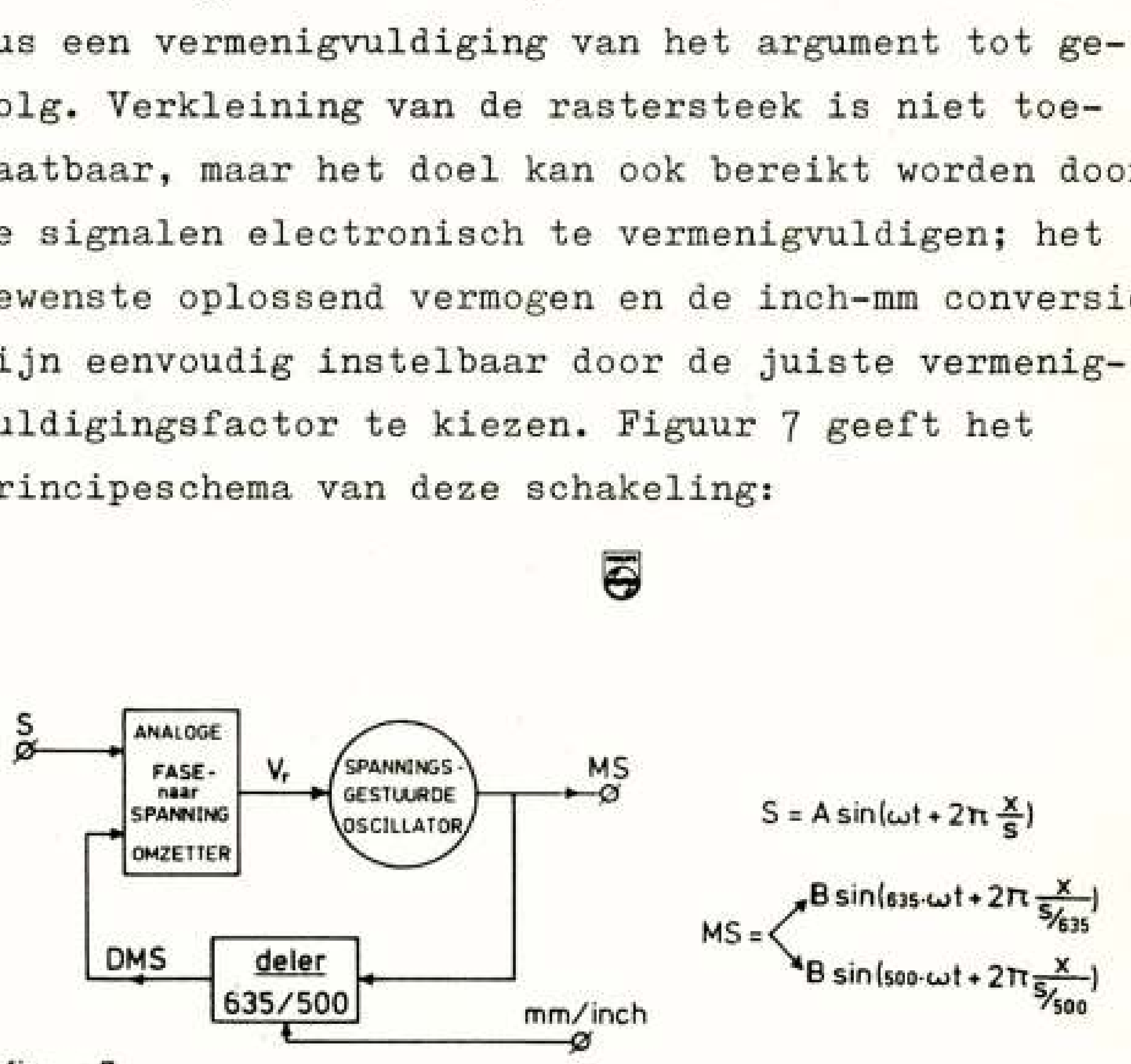
$$S_1 = A.\sin(\omega t + 2\pi\frac{x}{s})$$

$$S_2 = A.\sin(\omega t - 2\pi\frac{x}{s})$$

Nadere beschouwing van deze signalen leert dat bij een verplaatsing in de positieve x-richting het faseverschil tussen S_1 en S_2 toeneemt, terwijl omgekeerd een verplaatsing in de negatieve x-richting een afname van het faseverschil tot gevolg heeft. Detectie van het teken van de verandering van het faseverschil geeft dus de richting van de verplaatsing.

De grootte van de verplaatsing lijkt ook eenvoudig te bepalen door het lineaire verband tussen het faseverschil en x. Dit geldt echter alleen voor zuiver sinusvormige signalen en de opnemersignalen zijn helaas slechts bij benadering sinusvormig. Een verandering van het faseverschil met 2π kan echter wel nauwkeurig vastgesteld worden. Anders gezegd: de adapter meet het faseverschil tussen S_1 en S_2 in incrementen van 2π radialen. De verplaatsing van de opnemer t.o.v. de liniaal wordt dan gemeten in incrementen van $\frac{1}{2}s$ = 0,3175 mm. Dit oplossend vermogen is ontoelaatbaar klein en bovendien geen eenvoudige decimale fractie van de mm (wel van de inch, nl 0,0125 inch).

Het argument van de signalen is omgekeerd evenredig met de rastersteek. Vergroting van het oplossend vermogen door deling van de rastersteek heeft dus een vermenigvuldiging van het argument tot gevolg. Verkleining van de rastersteek is niet toelaatbaar, maar het doel kan ook bereikt worden door de signalen electronisch te vermenigvuldigen; het gewenste oplossend vermogen en de inch-mm conversie zijn eenvoudig instelbaar door de juiste vermenigvuldigingsfactor te kiezen. Figuur 7 geeft het principeschema van deze schakeling:



figuur 7

De spanningsgestuurde oscillator genereert het signaal MS met de nominale frequentie 635 ω of 500 ω, dat door de deler door 635 of 500 gedeeld wordt, zodat het signaal DMS de frequentie ω heeft. De instelling van het deeltal wordt bepaald door de spanning op de lijn 'mm/inch'. De analoge fase-naar-spanning omzetter transformeert het faseverschil tussen DMS en S in een analoge spanning, die de frequentie van de oscillator bijstuurt totdat DMS in de pas loopt met S.

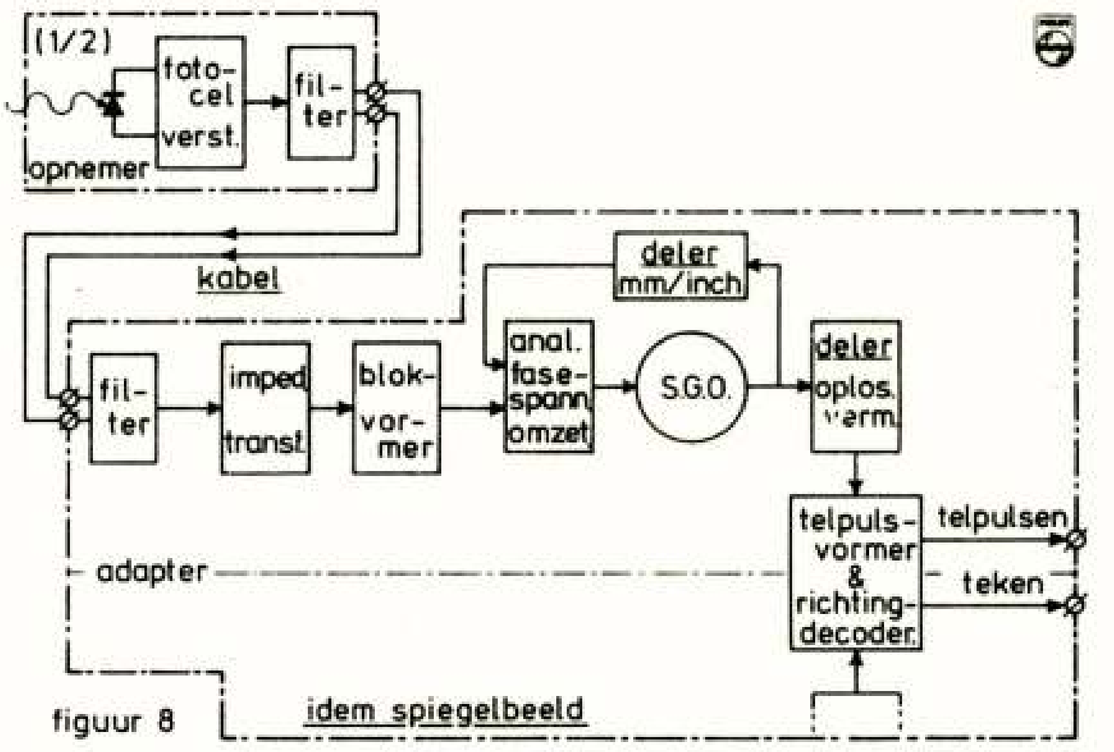
In de stand 'mm' is de schijnbare rastersteek s/635 = 1 µm, dus het oplossend vermogen is 0,5 µm. In de stand 'inch' is de schijnbare rastersteek s/500 = 0,000.05 inch en het oplossend vermogen 0,000.025 inch. Een kleiner oplossend vermogen kan eenvoudig verkregen worden door de frequentie van het signaal MS te delen door een geschikt (geheel) getal, of door een andere vermenigvuldigingsfactor te kiezen. De laatste oplossing eist echter een aanpassing van de oscillator.

De keuze van de rastersteek kan nu nader toegelicht worden. De vermenigvuldigingsfactor mag niet groter zijn dan strikt noodzakelijk is om te voorkomen dat de frequentie van MS te hoog wordt (voor een oplossend vermogen van 0,5 µm is bij een steek van 0,635 mm en een netfrequentie van 60 Hz de nominale frequentie van MS reeds 12,5 MHz!). De interpolatiefactor is in het algemeen een gewone breuk, waarvan de teller de vermenigvuldigingsfactor is en de noemer het getal waardoor de frequentie van MS gedeeld moet worden om het verlangde oplossend vermogen te verkrijgen. De rastersteek moet dus zodanig gekozen worden dat de noemer van de interpolatiefactor zo klein mogelijk is. Bovendien is de regelkring slechts in een smal frequentiegebied stabiel, zodat de twee vermenigvuldigingsfactoren dicht bij elkaar moeten liggen.

Per definitie geldt: <u>1 inch = 25,4 mm.</u>

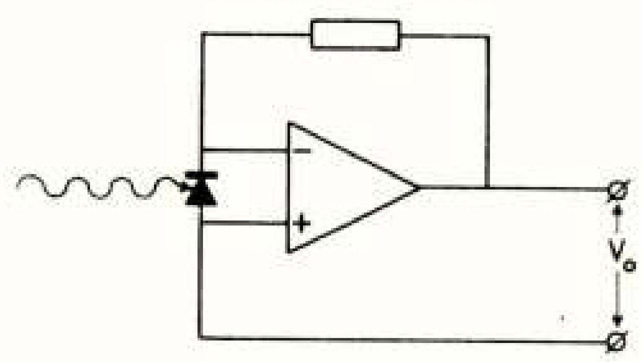
Hieruit volgt dat wanneer de rastersteek een decimale fractie van de mm is, de noemer van de inch-interpolatiefactor tenminste de factor 127 bevat; bij een decimale fractie van de inch komt deze factor in de teller van de mm-interpolatiefactor. De rastersteek moet dus een decimale fractie van de inch zijn en de keus is gevallen op
s = 0,025 inch = 0,635 mm.

Figuur 8 toont het blokschema van de electronica. Twee elementen uit deze schakeling worden wat meer gedetailleerd beschreven.



figuur 8

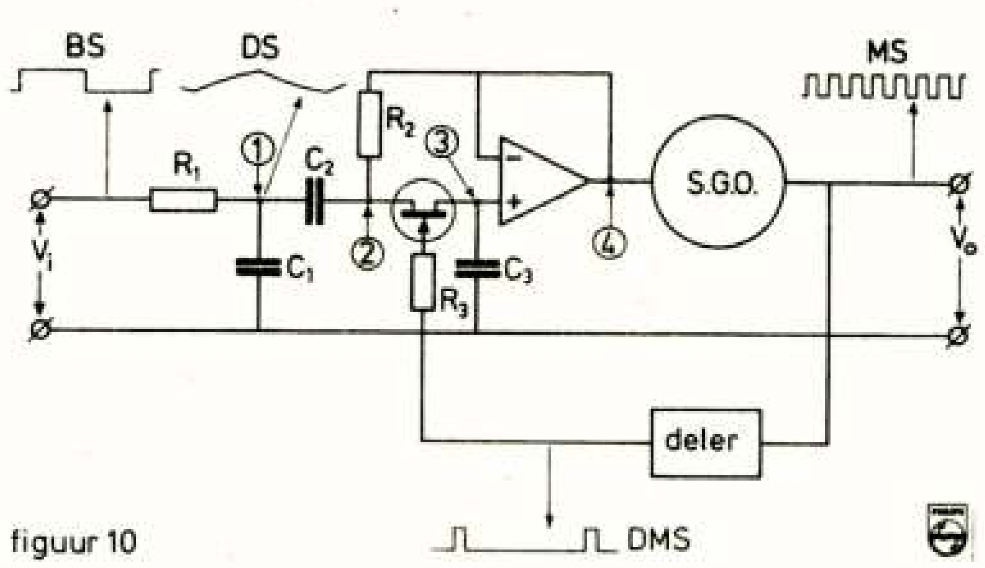
<u>a. De fotocelstroomversterker.</u> De toegepaste Si-fotocellen hebben een groot oppervlak en daardoor ook een grote eigen capaciteit, welke parallel staat aan de belastingsweerstand. De gemoduleerde lichtstroom wordt door de fotocel omgezet in een wisselstroom, waardoor over de belastingsweerstand een wisselspanning ontstaat. De capaciteit vormt echter een kortsluiting voor deze wisselspanning, waardoor de frequentiekarakteristiek reeds bij 1 kHz begint af te vallen. De invloed van de eigen capaciteit kan echter geëlimineerd worden door de fotocel op te nemen in een schakeling die de spanning over de fotocel constant houdt; zie figuur 9.



figuur 9

De terugkoppeling houdt de spanning op de - ingang van de operationele versterker op een constant niveau, waardoor de spanning van de Si-fotodiode constant blijft, ongeacht de geleverde stroom. Bij experimenten bleek de versterkingsfactor van de schakeling tot 300 kHz vrijwel constant te zijn.

<u>b. De synchronisatie van de spanningsgestuurde oscillator</u> (figuur 10)

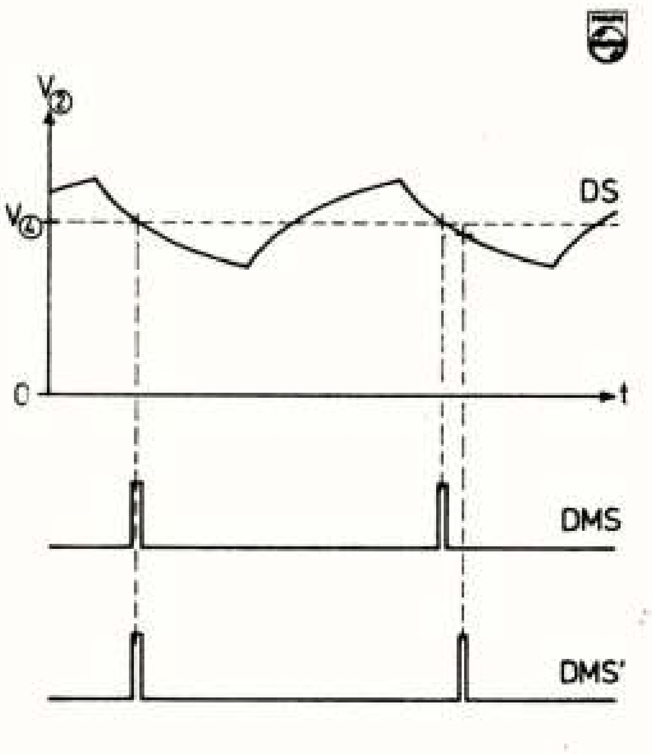


figuur 10

Deze schakeling staat bekend als de 'interpolator'.

Het digitale signaal BS uit de blokvormer wordt door het netwerk R_1/C_1 getransformeerd tot het analoge, min of meer driehoeksvormige signaal DS op punt ① . Via koppelcondensator C_2 komt dit signaal op punt ② . Het gelijkspanningsniveau op dit punt wordt via weerstand R_2 bepaald door de uitgang van de operationele versterker. De positieve pulsen van het signaal DMS uit de deler brengen de veldeffecttransistor in geleiding, waardoor condensator C_3 al naar gelang de omstandigheden bijgeladen of ontladen wordt tot de spanning op punt ③ gelijk is aan die op punt ② . De operationele versterker is geschakeld als spanningsvolger, zodat de uitgangsspanning op punt ④ gelijk is aan de ingangsspanning op punt ③ .

De schakeling is zo ontworpen, dat bij volkomen synchronisatie de pulsen van het signaal DMS vallen in het midden van de dalende flanken van signaal DS. Wanneer nu door de een of andere oorzaak de frequentie van MS en dus ook die van DMS wat lager wordt, dan wordt de afstand tussen de pulsen groter, waardoor het snijpunt op de flank van DS lager komt te liggen. Hierdoor daalt de spanning op punt ③ en dus ook op punt ④ , waardoor de frequentie van de spanningsgestuurde oscillator hoger wordt en DMS weer synchroon wordt met DS; zie figuur 11.



figuur 11

De terugkoppeling van de spanning op punt ④ via weerstand R_2 naar punt ② zorgt er voor dat de synchronisatie op een goed gedefinieerd punt en wel op het midden van de dalende flank van DS geschiedt. Hierdoor wordt bereikt dat de twee regelkringen van de adapter zich vrijwel identiek gedragen, waardoor de fasedrift tussen de signalen MS_1 en MS_2 verwaarloosbaar klein is. Dit is belangrijk omdat deze fasedrift overeen komt met een schijnbare verplaatsing van de opnemer en dus een nulpunt-verschuiving tot gevolg heeft.

Voordracht gehouden op 5 juni 1973 tijdens de 230ste werkvergadering in het Delta-hotel te Vlaardingen.

METING VAN DE AFSTAND TOT DIFFUUS REFLECTERENDE OBJECTEN M.B.V. LASERS

Ir. T. Bakker
Physisch Laboratorium TNO

Wanneer men geen hoekreflectoren op het te meten object plaatst, is het bereik van een laserafstandmeter aanzienlijk kleiner t.g.v. de extra verzwakking, die optreedt door de diffuse reflectie van de op dit voorwerp vallende laserstraling. Er zijn uitvoeringen mogelijk met gemoduleerde continue lasers en met gepulste vaste-stof lasers. Enige relevante eigenschappen van de toegepaste vaste-stof lasers en van de in aanmerking komende detectoren worden besproken. Resultaten van verschillende uitvoeringsvormen worden vermeld. Enkele voorbeelden worden getoond van de propagatie-eigenschappen van atmosfeer voor deze coherente stralingsbronnen.

INLEIDING

In fig.1 is het principe van de laserafstandmeter geschetst. Uit de looptijd van de laserstraling

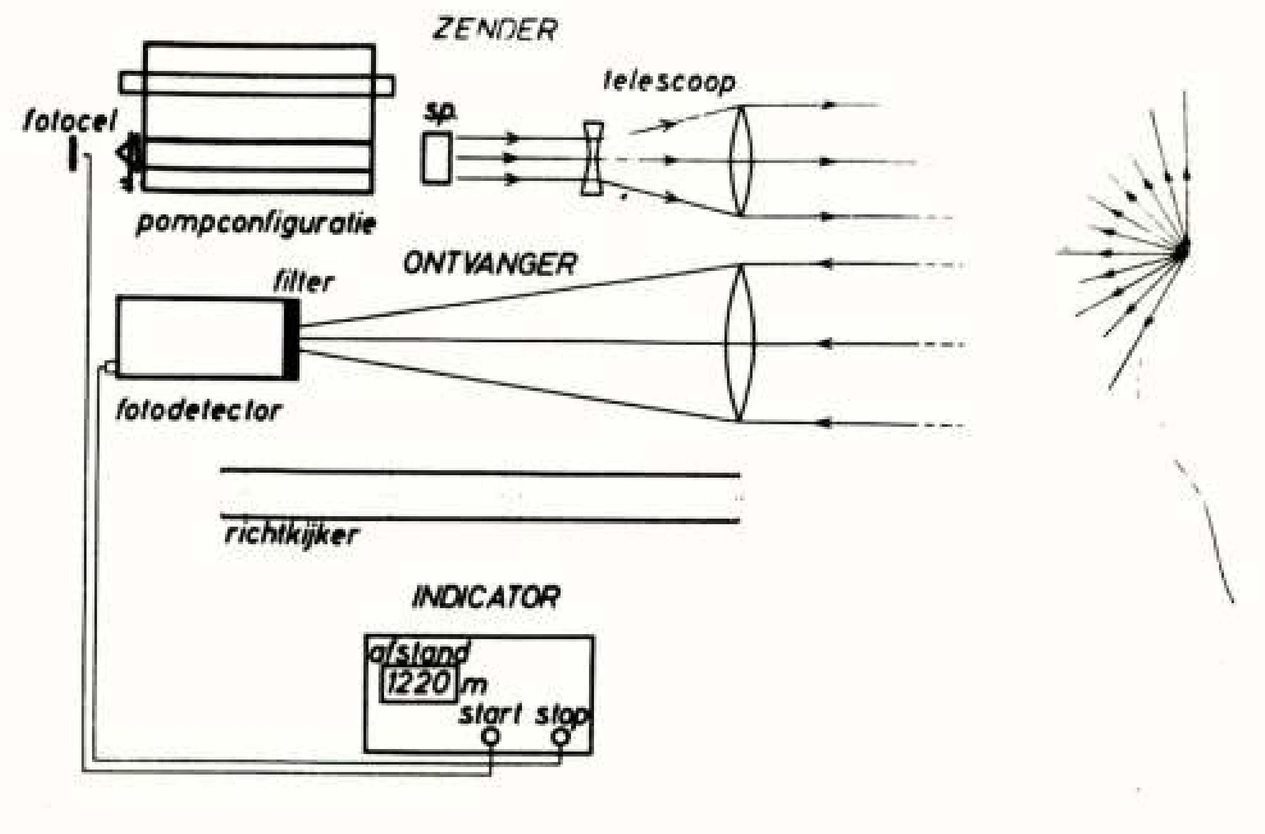


Fig. 1. Principe van de laserafstandmeter

tussen uitzenden en ontvangst berekent men met behulp van de bekende lichtsnelheid de afstand tot het doel. Als laserzenders kunnen worden gebruikt:

a. Gemoduleerde continue lasers. Het verschil in fase tussen de modulatie van de uitgezonden en die van de ontvangen straling wordt gemeten. Wanneer men de uitgezonden laserbundel met een aantal frequenties moduleert is een nauwkeurige en ondubbelzinnige meting van de afstand tot het voorwerp mogelijk.

b. Gepulste lasers. De straling wordt uitgezonden in de vorm van een korte, intense puls. Op het moment, dat de puls wordt uitgezonden, wordt de tijdmeter gestart. Op het moment, dat het signaal van de detector een drempelwaarde overschrijdt, stopt de tijdmeter. In een dergelijke uitvoering wordt de nauwkeurigheid in de afstandmeting in eerste instantie begrensd door de stijgtijd van de puls.

VERZWAKKING T.G.V. DIFFUSE REFLECTIE

Wanneer op het voorwerp, waarvan men de afstand wil meten geen hoekreflectoren kunnen worden aangebracht, wordt de grootte van het ontvangen signaal geheel bepaald door de diffuse reflectiecoëfficient ε van dit voorwerp. Men berekent voor het vermogen δP_d van de ontvangen straling t.g.v. een uitgezonden vermogen P_u;

$$\delta P_d = \varepsilon\, P_u \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{D}{2R}\right)^2 \left\{T(\lambda)\right\}^2 \cos\nu \qquad (1)$$

waarin:

- $\delta\alpha$ = grootte in hoekmaat van het voorwerp
- α = divergentie van de uitgezonden bundel
- D = diameter van de ontvangoptiek
- R = afstand tot het voorwerp
- $T(\lambda)$ = transmissie van de atmosfeer bij de golflengte λ van de straling
- ν = hoek tussen de normaal op het oppervlak en de as van de ontvanger

Om te vergelijken; wanneer een hoekreflector met een diameter $d = R\delta\alpha$ wordt toegepast, dan vindt men voor $2d < D$;

$$\delta P_h = P_u \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 \left\{T(\lambda)\right\}^2 \qquad (2)$$

Voor een gelijke waarde van $\frac{\delta\alpha}{\alpha}$ en $T(\lambda)$ en voor $\cos\nu \approx 1$ wordt de verhouding

$$\frac{\delta P_d}{\delta P_h} = \varepsilon \left(\frac{D}{2R}\right)^2 \qquad (3)$$

Stel: $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-1}$
$D = 10^{-1}$ m
$R = 10^{4}$ m

Dan is: $\frac{\delta P_d}{\delta P_h} = 10^{-11}$!

Nu zal in het algemeen bij gebruik van een hoekreflector de verhouding $\frac{\delta\alpha}{\alpha}$ veel kleiner zijn (bijv. 10^{-2}x) dan in het geval van een diffuus reflecterend voorwerp. Desondanks kan gesteld worden, dat de verzwakking, die tussen zender en ontvanger plaatsvindt, bij diffuus reflecterende voorwerpen vele ordes groter is dan wanneer een hoekreflector toegepast kan worden.

Het bereik, zonder toepassing van hoekreflector, is dan ook aanzienlijk kleiner dan wanneer deze wel toegepast worden. Om toch een redelijk bereik te kunnen halen, dienen krachtige lasers, gevoelige detectoren en ruisarme detectorschakelingen te worden gebruikt.

N.B. Bij de toepassing van krachtige lasers die straling uitzenden met een golflengte, die ligt tussen 0,4 μm en 1,4 μm, dient men wel de noodzakelijke voorzorgen te nemen om beschadigingen van het netvlies van het oog te voorkomen!

TOEPASSINGEN

Voorbeelden van civiele toepassingen waarbij geen hoekreflectoren kunnen worden aangebracht zijn:

a. de continue hoogtemeting vanuit vliegtuigen (zie fig.2).
b. de meting van de wolkenhoogte vanaf de grond.
c. de meting van de diepte van de zee, vanuit een vliegtuig. Men krijgt een reflectie van het oppervlak en van de bodem (alleen voor niet te diep water); uit het tijdsverschil bepaalt men de diepte.
d. atmosferisch onderzoek met behulp van lidartechnieken. Uit de terugverstrooide straling kan men de dichtheid en evt. de grootte van aerosolen in de atmosfeer bepalen. Een gedeelte van het terugverstrooide licht heeft bovendien een frequentieverschuiving ondergaan, die karakteristiek is voor het gas, waaraan deze verstrooiing heeft plaatsgevonden (Raman effect).

   Een volledige analyse van de terugverstrooide straling levert dus de mogelijkheid om de verontreinigingen, die zich in de atmosfeer bevinden kwalitatief en kwantitatief te bepalen.
e. Meting van waterverontreinigingen. Bestraalt men het wateroppervlak met lasers, die straling in het ultraviolette spectrum uitzenden, dan wordt door sommige stoffen, die zich in het water bevinden (met name olie en algen), karakteristieke fluorescentiestraling geëmitteerd. Een analyse van deze fluorescentiestraling maakt het in principe mogelijk om deze verontreinigingen te bepalen.

UITVOERINGSVORMEN MET CONTINUE LASERS

In fig.2 is de registratie gegeven van de hoogtemeting vanuit een vliegtuig m.b.v. een gemoduleerde continue gaslaser. Het vliegtuig vloog met een snelheid van 300 km per uur op een hoogte van 300 m boven een stadion. Duidelijk zijn de treden van de tribunes en de hoogteverschillen tussen sintelbanen en het terrein te onderkennen. Gebruik is gemaakt van een continue Helium-Neon gaslaser, die op meerdere frequenties is gemoduleerd. De meting berust op de bepaling van het verschil in fase tussen de modulatie op het ontvangen signaal en die van het uitgezonden signaal. Bij de toepassing van deze eenvoudige techniek dient men zich wel te realiseren dat elke parasitaire reflectie (bijv. t.g.v. takjes of wolkjes) de fase van het gereflecteerde signaal en daarmee het resultaat van de afstandmeting beïnvloedt. Bij een afstandmeting, waarbij een hoekreflector wordt toegepast is de bijdrage van deze parasitaire reflecties tot het totale signaal gering omdat ze afkomstig zijn van diffuus reflecterende voorwerpen en dan dus relatief klein zijn (zie formule 3).

Het is mogelijk[5)] de afstand tot een doel te meten door de frequentie van een kooldioxyde laser volgens een zaagtandpatroon in de tijd te variëren en het frequentieverschil tussen het ontvangen en uitgezonden signaal te meten (chirp-radar). Het vermogen van deze laser is groot (10 - 100 W) en de transmissie van de atmosfeer bij deze golflengte (10,6 μm) is gunstig. Parasitaire reflecties hebben bij deze methode geen invloed op de afstandmeting. De resolutie wordt beperkt door de snelheid, waarmee de frequentie veranderd kan worden en door de frequentiestabiliteit van de laser.

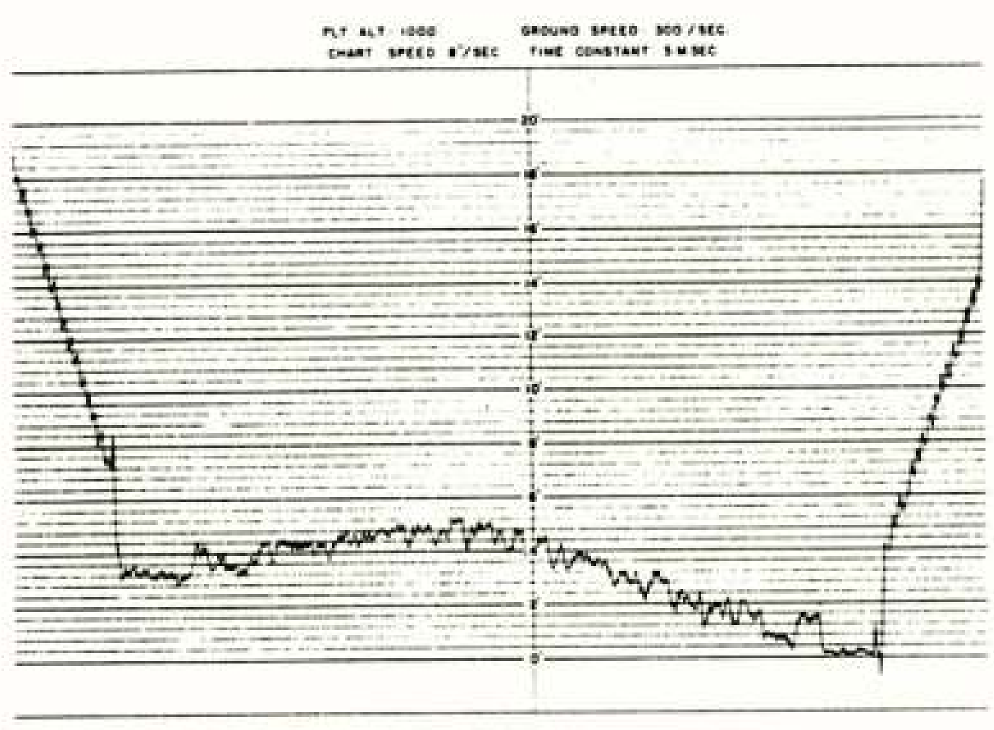


Fig. 2. Continue hoogtemeting vanuit een vliegtuig m.b.v. een gemoduleerde continue laser

UITVOERINGEN MET BEHULP VAN GEPULSTE VASTE-STOF LASERS

Constructie en eigenschappen van geschikte lasers: kwaliteitsschakeling

Een vaste-stof laser is opgebouwd uit een staafje G (zie fig.3) van een geschikt materiaal, dat is opgenomen in een optische resonator. Deze bestaat in het eenvoudigste geval uit een configuratie van twee evenwijdige, loodrecht op de as geplaatste, vlakke spiegels. Men kan aantonen, dat er binnen een dergelijke resonator slechts een beperkt aantal ruimtelijke veldverdelingen (modes) met geringe verliezen voorkomen. In een vereenvoudigde voorstelling kan men de veldverdeling met de laagste verliezen opgebouwd denken uit loodrecht op de as staande vlakke golven, die zich met een snelheid C, gelijk aan die van het licht in een richting evenwijdig aan de optische as verplaatsen.

Om versterking in het lasermateriaal te verkrijgen dient dit geactiveerd te worden; het z.g. "pompen". In praktische uitvoeringen geschiedt dit door het materiaal met een flitslamp F te bestralen. Het door de flitslamp uitgezonden licht wordt m.b.v. een pompreflector C in het materiaal geconcentreerd.

Tijdens de bestraling met de flitslamp neemt de versterkingsfactor van het lasermateriaal toe. Om een korte, steile puls te verkrijgen gaat men als volgt te werk. Gedurende het pompen wordt de kwaliteitsfactor Q van de resonator onderdrukt, bijv. door één van de spiegels schuin op de as te plaatsen of door een snelle sluiter, die in de resonator is opgenomen, dicht te schakelen. Wanneer de versterking in het materiaal maximaal is, herstelt men de Q van de resonator plotseling. De in het materiaal aanwezige energie wordt door de wisselwerking tussen het veld in de resonator en het materiaal omgezet in energie van het veld binnen de resonator en vervolgens uit de laserresonator gekoppeld (Eén van de spiegels R heeft daartoe een bepaalde doorlaatbaarheid).

Als kwaliteitsschakelaar (Q-switch) worden elektro-optische sluiters toegepast (zie fig.3) of wordt één van de reflectoren roterend uitgevoerd. Geschikte lasermaterialen zijn:

robijn: dit is een éénkristal van Al_2O_3 met een toeslag van 0,05% chroomatomen. De golflengte λ van de uitgezonden straling is 0,694 μm.

neodymium: in een toeslag van enkele procenten gebracht in optisch glas of in éénkristallen van Yttrium Aluminium Granaat (YAG). De golflengte λ is 1,06 μm.

Met de boven beschreven techniek zijn hiermee pulsen opgewekt met piekvermogens van 1 - 100 MW en tijdsduren van ca. 20 ns.

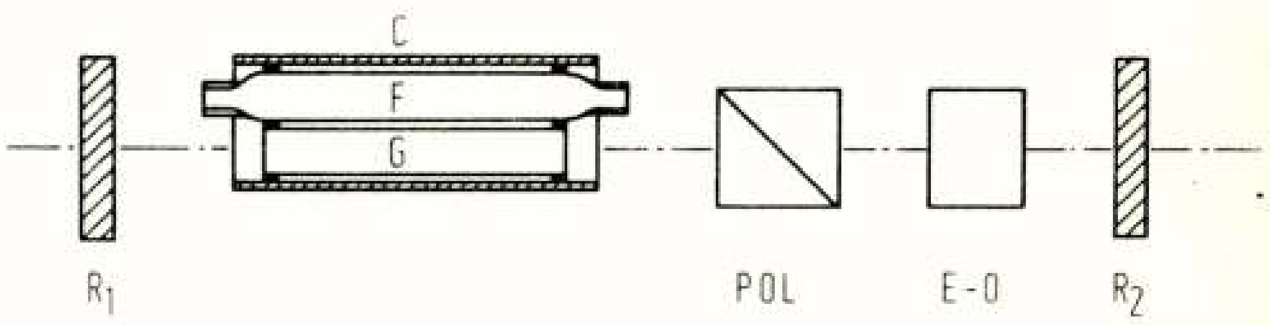


Fig. 3. Opbouw van een gepulste vaste-stoflaser met een elektro-optische kwaliteitsschakelaar
POL. = Polarisator
E.O. = elektro-optisch kristal

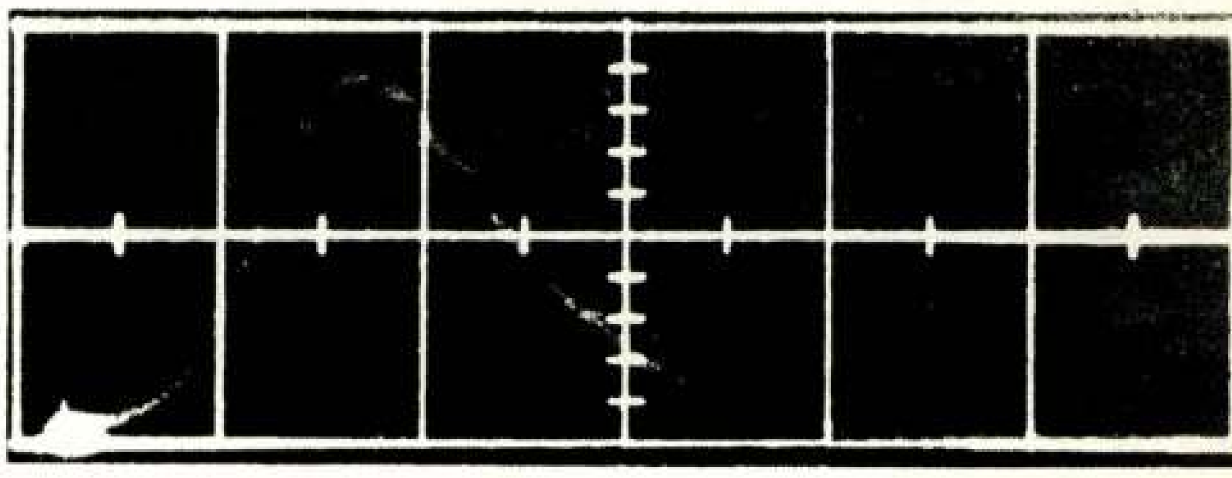


Fig. 4. Gedaante van de puls van een neodymium: YAG laser met elektro-optische sluiter (KD*P)
Horizontaal: 10 ns/eenheid
Vertikaal : 2.5 MW/eenheid

Pulse-transmissie-mode schakeltechniek

De boven beschreven techniek heeft als nadeel, dat de kwaliteit van de resonator zo groot mogelijk is op het moment, dat de straling uit de resonator gekoppeld moet worden. Het duurt dan ook relatief lang, voordat de in de resonator aanwezige energie uitgezonden is. In een verbeterde schakeltechniek wordt de kwaliteit van de resonator slechts hersteld gedurende een tijd die nodig is om het veld in de resonator op te bouwen; daarna wordt de kwaliteit van de resonator weer snel verkleind en wel op een zodanige wijze, dat de veldenergie snel uit de resonator gekoppeld wordt[3] (pulse-transmissie-mode Q-switch). Op deze wijze is het mogelijk gebleken pulsen met tijdsduren van ca. 5 ns te genereren. Het piekvermogen neemt daarbij met een factor 2 tot 5 toe.

Mode-locked lasers

Voor die golflengtes λ, waarvoor de resonatorlengte gelijk is aan een geheel aantal malen een halve golflengte bouwt zich een intens veld binnen

de resonator op. Binnen de fluorescentieovergang van het lasermateriaal zijn er meestal een groot aantal golflengtes, waarvoor aan deze voorwaarde wordt voldaan. Zonder speciale voorzorgen zijn de fases van deze afzonderlijke modi niet gesynchroniseerd. In een vlak, loodrecht op de optische as binnen de resonator wordt de resulterende veldsterkte:

$$E_T = \sum_{k=0}^{2M} E_k \, e^{i[(\omega_0 + k\Delta\omega)t + \Phi_k]} \qquad (4)$$

E_k = amplitude van het veld van de K^{de} mode

$\Delta\omega$ = verschil in hoekfrequentie tussen twee naburige modi

Φ_k = fase, behorende bij het veld van mode K

Het is mogelijk de fases van alle modi op de uitkoppelspiegel te synchroniseren. Dan geldt:

$$\Phi_k - \Phi_{k-1} = \alpha = \text{constant} \qquad (5)$$

De formule 4 stelt dan een pulstrein voor. De periode t_c is gelijk aan de rondlooptijd door de resonator. De pulsbreedte is gelijk aan $t_c(2M + 1)^{-1}$. De pulshoogte is evenredig met $(2M + 1)^2$.

In fig.5 is het resultaat van een mode-lock experiment aan een neodymium-YAG laser gegeven. De vorm van de individuele pulsen is begrensd door de responsietijd van de gebruikte detectieschakeling (0,4 ns).

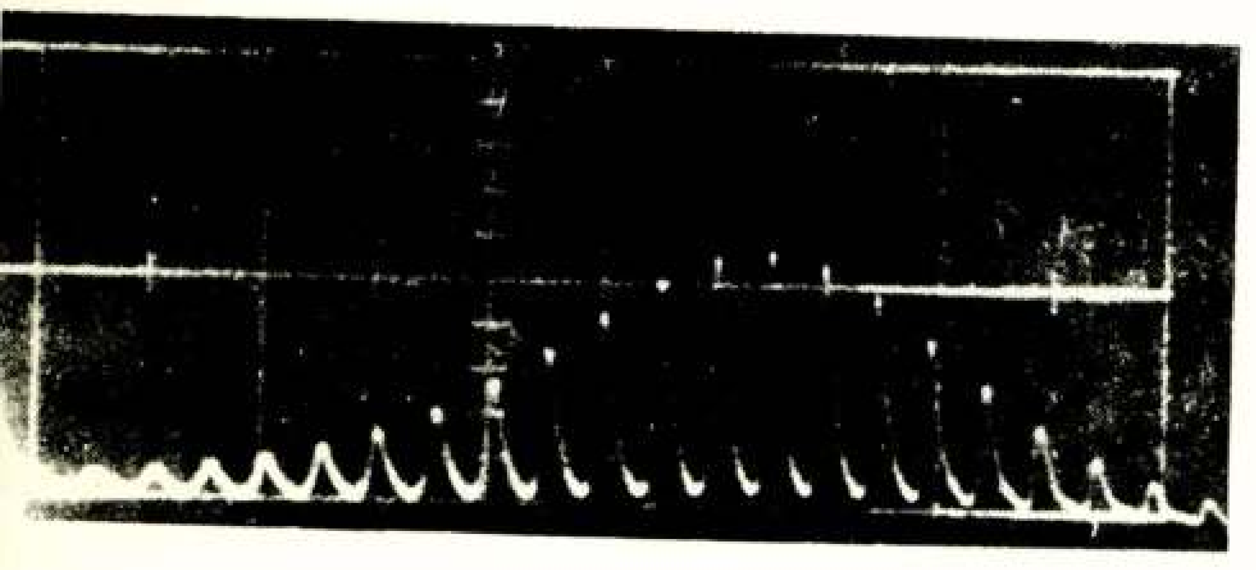


Fig. 5. Mode-locked neodymium-YAG laser
Horizontaal: 10 ns/eenheid
Passieve Q-switch: Eastman-Kodak 9740 oplossing

Het is mogelijk om uit deze pulstrein één enkele puls te isoleren en deze verder te versterken. Op deze wijze zijn pulsen met piekvermogens van vele GW en een pulsduur van 10 ps gerealiseerd. Detectoren met een dergelijke responsietijd en een redelijke gevoeligheid zijn echter niet bekend.

DETECTOREN EN DETECTIESCHAKELINGEN

Nodig zijn een gevoelige detector met een kleine responsietijd, gevolgd door een versterker met een brede band B en een laag ruisgetal F.

Het verband tussen de nauwkeurigheid en de bandbreedte B is als volgt. De stijgtijd van de versterker $\Delta t \sim (3B)^{-1}$. De nauwkeurigheid in de afstandmeting

$$\Delta l = \frac{c}{2}\,\Delta t = 5.10^7 (B)^{-1} \text{ m} \qquad (6)$$

(Dit verband gaat niet meer op, zodra de stijgtijd van de versterker kleiner wordt dan die van de uitgezonden laserpuls zelf).
Geschikte detectoren zijn bijv. fotomultipliers en avalanche fotodiodes.

Fotomultiplier

Fotomultipliers lijken daarom zo geschikt als detector, omdat er t.g.v. het secundaire emissieproces een versterker ingebouwd is met een laag ruisgetal. Het is zodoende mogelijk een kleine belastingsweerstand toe te passen (noodzakelijk om de grote bandbreedte te verkrijgen), terwijl de ruis desondanks bepaald wordt door de ingangstrap, d.w.z. de fotokathode.

Dit gaat echter alleen op voor bandbreedtes, die kleiner zijn dan ca. 1 MHz. Voor grotere bandbreedtes krijgt de ruis een gepulst karakter (zie fig.6)[1]. Elke ruispuls ontstaat t.g.v. één enkel elektron, dat van de kathode vertrekt. De momentane versterking van een fotomultiplier varieert dus sterk. Uit metingen blijkt, dat de variatie in de anodestroom t.g.v. één enkel elektron, dat van de fotokathode vertrekt, een factor 10 kan bedragen.

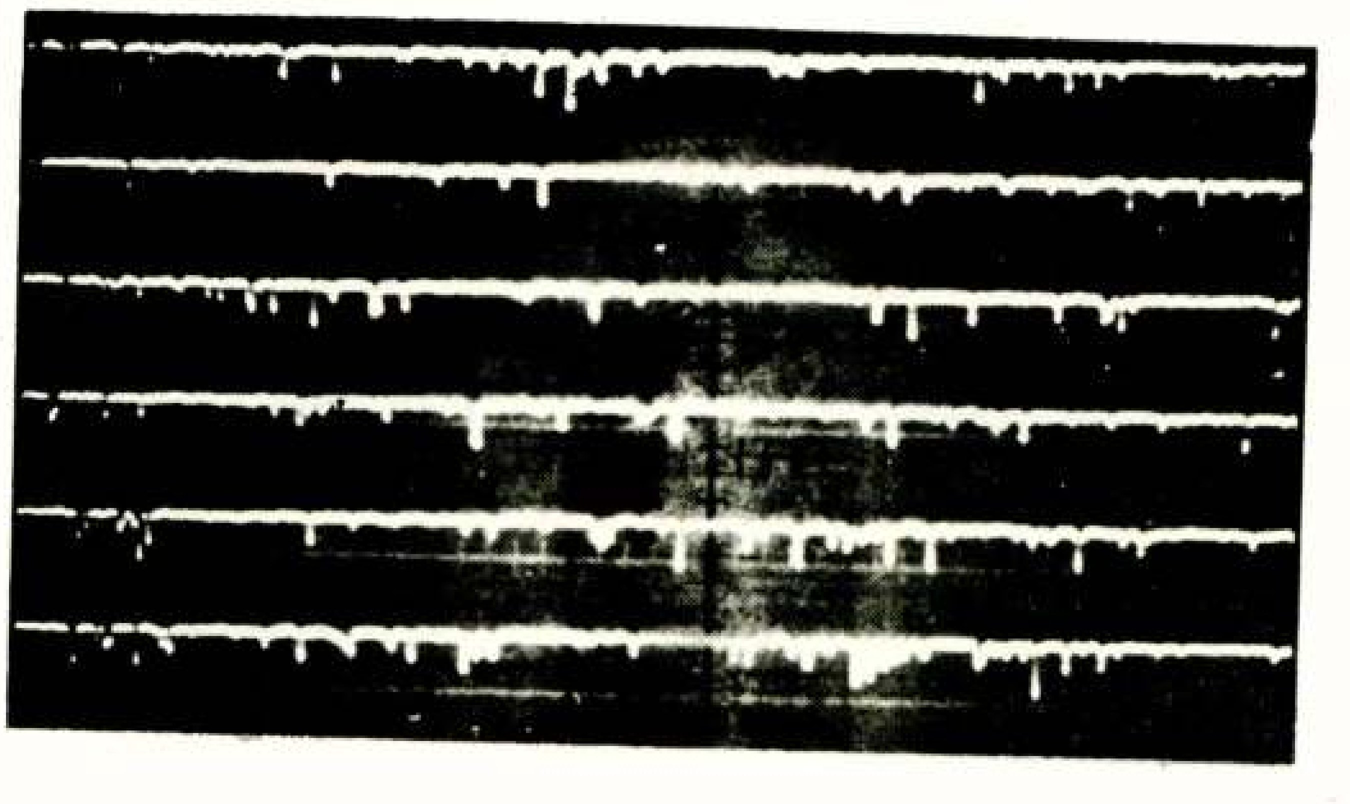


Fig. 6. Ruisstroom, gemeten aan de anode van een fotomultiplier: Horizontaal 0,5 μs/eenheid
Anodestroom: 3 μA

Wanneer een fotomultiplier met S-1 kathode gebruikt wordt voor de detectie van 1,06 µm straling moet men erop bedacht zijn, dat een kleine verschuiving van de gevoeligheidskromme naar kortere golflengtes desastreuse gevolgen voor de gevoeligheid bij 1,06 µm heeft. Dergelijke verschuivingen doen zich met name voor als er gedurende een langere tijd teveel stroom door de fotomultiplier loopt.

Fotodiodes

In vele afstandmeters wordt een silicium sperlaag fotodiode als detector toegepast. Tengevolge van de capaciteit van deze diode kan de belastingsweerstand R_L niet te groot gekozen worden. Men kan aantonen, dat onder normale omstandigheden de ruis bepaald wordt door de ruis van de voorversterker. De ruisstroom door de belastingweerstand wordt dan:

$$\overline{i_r^2} = F\frac{4kTB}{R_L} \qquad (7)$$

De signaalstroom i_S is bij een vermogen δP van de opvallende straling en bij een quantum rendement η gelijk aan:

$$i_S = \frac{\delta P}{h\nu}\,\eta q \qquad (8)$$

$h\nu$ is de energie van een foton
q is de lading van een elektron

Alhoewel de effectieve waarde van de ruis bij het gebruik van een fotodiode veel groter is dan die van een fotomultiplier, is de statistiek van de ruis voor een fotodiode detector weer zoveel gunstiger, dat men bij een golflengte van 1,06 µm lagere waarden voor het vermogen van de opvallende straling kan detecteren[2]. Bij een schakeling, waarbij een drempelwaarde moet worden overschreden is n.l. de piekwaarde van de ruis de relevante ruisparameter.

Avalanche-fotodiodes

Een speciale uitvoering van de fotodetector is die waarbij de veldsterkte in de sperlaag van de fotodiode zo groot gemaakt kan worden, dat de door de opvallende straling vrijgemaakte ladingdragers tijdens de doorgang door deze laag t.g.v. stootionisatie extra ladingdragers vrijmaken. Het resultaat is, dat de fotostroom i_S door dit avalanche-effect met een factor M vergroot wordt. Vanzelfsprekend worden ook de stromen, die thermisch worden gegenereerd met deze factor vergroot.

In de praktijk blijkt, dat men op deze wijze een factor 10 à 100 in gevoeligheid kan winnen[4].

Tijdconstanten van sperlaagdiodes

In fig.7 is de opbouw van een fotodiode getekend. Men onderscheidt het ruimteladingsgebied A, waarbinnen een grote veldsterkte heerst en de aan weerszijden hiervan gelegen, veldvrije, diffusiegebieden D_1 en D_2.

Ladingdragers, die in het ruimteladingsgebied worden gegenereerd, worden door de hoge veldsterkte snel verwijderd. Ladingdragers, die in het diffusiegebied worden gegenereerd moeten echter eerst nog, naar het sperlaaggebied diffunderen, alvorens tot de fotostroom bij te dragen. Dit verschil in tijdconstante manifesteert zich duidelijk in het dynamische gedrag van de fotodiodes, zie fig.8. Voor een snelle fotodiode is dus een zeer speciale constructie vereist.

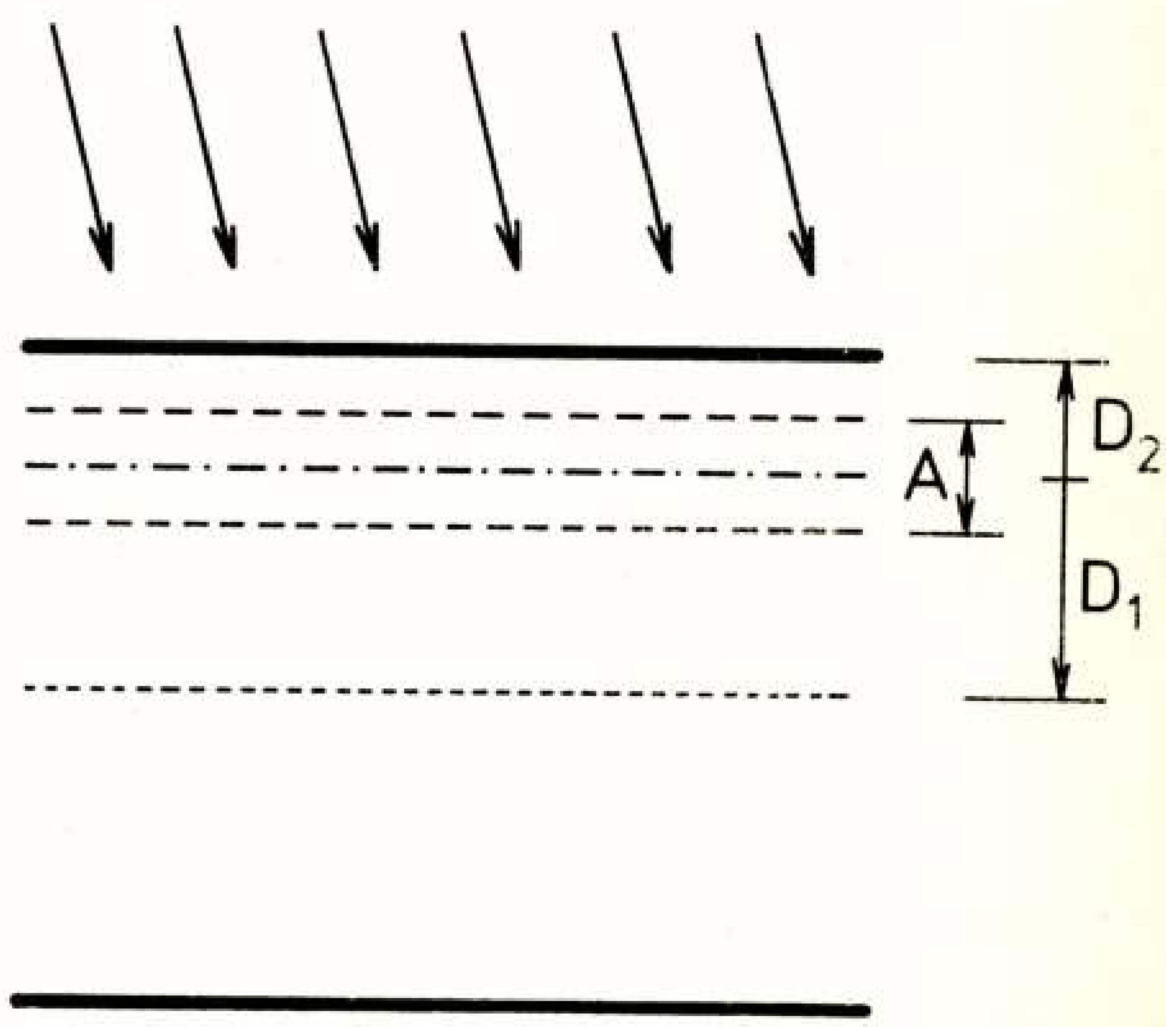


Fig. 7. Principe van de opbouw van een sperlaag fotodiode

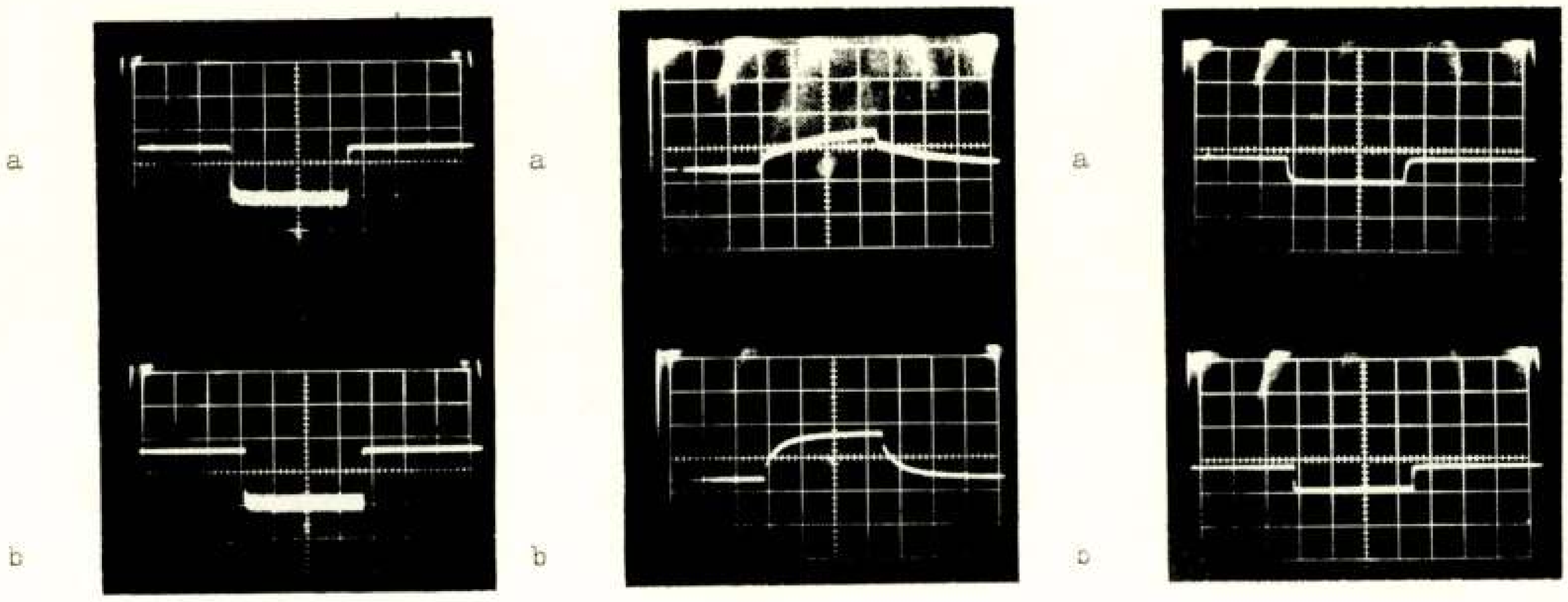
Coherente detectiesystemen

Elke fotonendetector is in principe een kwadratische detector, er worden intensiteiten, d.w.z. energieën mee gedetecteerd. Laat men op een dergelijke detector twee golffronten vallen, één de local-oscillator met de frequentie f_p en amplitude E_p en het signaal met de frequentie $f_s = f_p + \Delta f$ en de amplitude E_s, dan meet men de resulterende intensiteit:

$$I_t = a\,E_t^2 = a\left\{E_p\cos(\omega_p t+\varphi_p)+E_s\cos(\omega_s t+\varphi_s)\right\}^2$$

$$= \frac{a}{2}E_s^2+\frac{a}{2}E_p^2+a\,E_pE_s\cos(2\pi\Delta f t + \Delta\varphi)+\ldots \qquad (9)$$

Aangenomen is, dat beide golffronten evenwijdig aan het oppervlak van de fotodetector invallen, zodat $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_s$ langs dit oppervlak constant is.



RCA 7102 photo multiplier

SD 100 Si-pin diode

TIXL 57 Germanium Avalanche Photodiode

Fig. 8. Dynamisch gedrag van fotodetectoren
Horizontaal: krommen a: 0,2 μs/eenheid
krommen b: 1,0 μs/eenheid

In het resultaat vindt men dus het frequentieverschil, dat bijv. door de dopplerverschuiving wordt veroorzaakt terug. Gewoonlijk kiest men de amplitude van de local-oscillator veel groter dan die van het signaal. De conversieversterking neemt evenredig toe met E_p^2. De ruis neemt t.g.v. de shot-noise eveneens evenredig toe met E_p^2. Uiteindelijk bereikt men een situatie waarbij de ruis van de detector zelf te verwaarlozen is t.o.v. de shot-noise van deze local-oscillatorstroom[7]. Men kan berekenen, dat het kleinste vermogen, dat gedetecteerd kan worden[6]

$$\delta P_{min} = h\nu B \left(\frac{1 + 2\eta}{\eta}\right) \qquad (10)$$

Noodzakelijk is dat er een vast faseverband bestaat tussen de signaalgolf en de referentiegolf over het oppervlak, waarover de integratie plaatsvindt. Hieruit volgt o.m. dat de openingshoek $\Delta\varphi$ van de detector klein is;

$$\Delta\varphi \approx \frac{\lambda}{D} \qquad (11)$$

D = diameter van de apertuur

De fasefluctuaties t.g.v. turbulenties in de atmosfeer (zie verder) moeten bij toepassing van coherente detectie dus beperkt blijven.

Resultaten van gepulste afstandmeters

Op het Physisch Laboratorium zijn twee opstellingen voor afstandmeting gerealiseerd, te weten:
Eén met een draaiend dakkantprisma als kwaliteitsschakelaar. Het lasermateriaal is met neodymium gedoopt glas. Als detector wordt een silicium p-i-n fotodiode toegepast. Het bereik van deze afstandmeter is bij helder weer ca. 15 km. De nauwkeurigheid wordt door de klokfrequentie (30 MHz) van de elektronische teller begrensd en bedraagt 5 m.
Eén met een elektro-optische sluiter van kaliumdideuteriumfosfaat als kwaliteitsschakelaar. Het lasermateriaal is een neodymium gedoopt YAG kristal[8]. Als detector wordt een Germanium avalanche fotodiode gebruikt. Het bereik bij helder weer bedraagt 25 km. Door toepassing van een 150 MHz teller is de nauwkeurigheid van de afstandmeting opgevoerd tot 1 m.

PROPAGATIE-EIGENSCHAPPEN

Tengevolge van directe of indirecte verwarming van de atmosfeer door de zon ontstaan er lokale variaties in de brekingsindex van de atmosfeer. De fase van een invallend vlak golffront wordt door deze variaties in de brekingsindex lokaal verstoord. Dit verschijnsel manifesteert zich in intensiteitsvariaties in een vlak loodrecht op de propagatierichting.

In fig.9 is het resultaat gegeven dat ontstaat na de transmissie van een gefocusseerde bundel van een helium-neon gaslaser over een afstand van ruim 1100 m door de atmosfeer. Het resultaat is afhankelijk van vele atmosferische parameters, o.a. zonneschijn, wolkendek, windsterkte, regenval, hoogte boven de grond etc.

In fig.10 is het resultaat gegeven dat ontstaat na de transmissie over 1000 m door de atmosfeer t.g.v. de straling uitgezonden door een kwaliteitsgeschakelde neodymium/glaslaser. Deze laat-

ste opname is gemaakt door Ir. J. Rogge van de Koninklijke Militaire Academie te Breda.

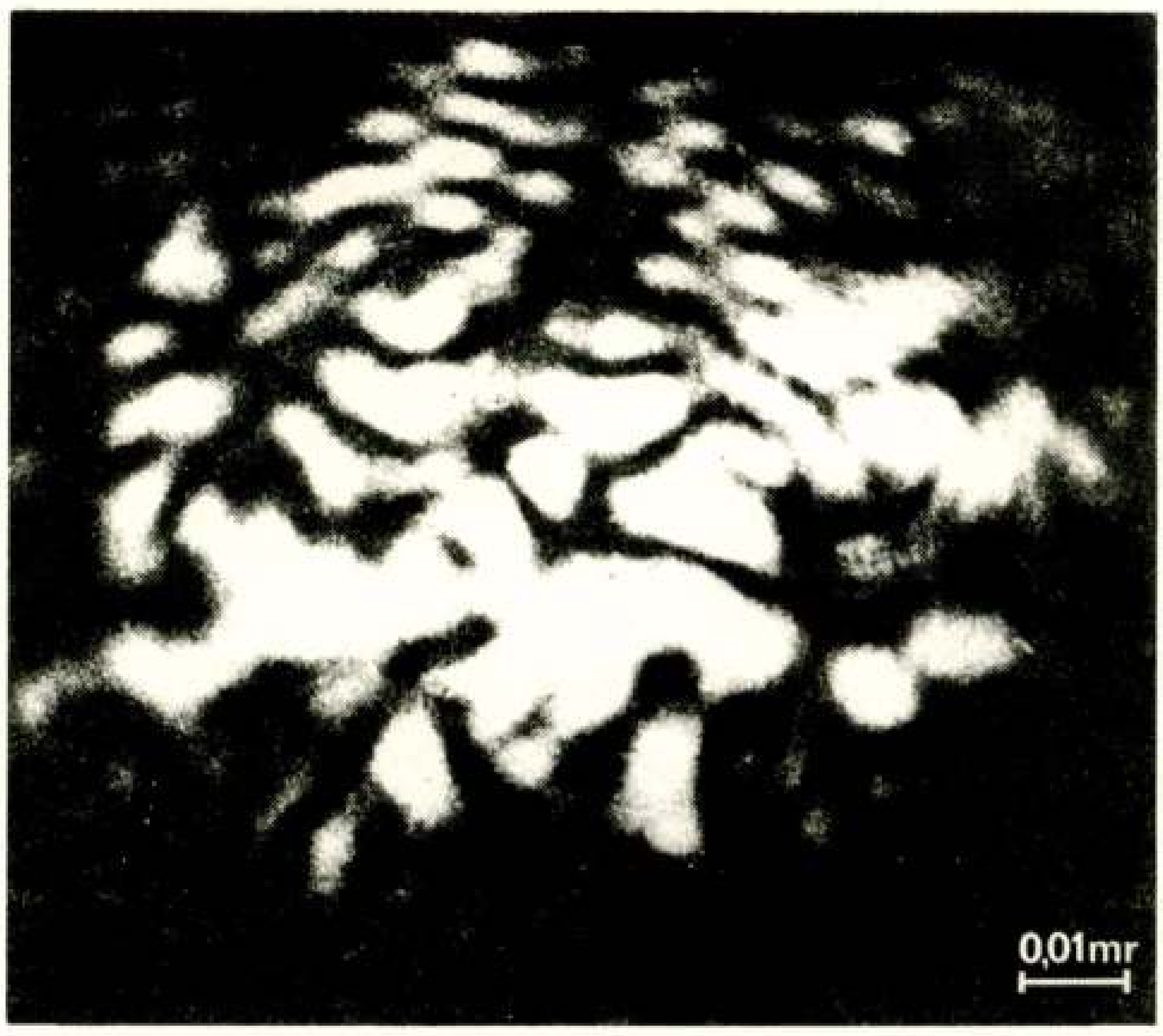


Fig. 9. Transmissie van een gefocusseerde bundel van een helium-neon laser door de atmosfeer (zonnig, warm weer, 22°C, lichte wind, zicht 16 km, gemiddelde hoogte 15 m, afstand 1115 m)



Fig. 10. Transmissie van de straling, afkomstig van een gepulste neodymium/glaslaser over een afstand van 1000 m door de atmosfeer. 5 cm komt overeen met 1 mr. (Opname gemaakt door Ir. J. Rogge van de K.M.A.)

Literatuur

1. T. Bakker (1967)
Applied Scientific Research, Vol.17, no.6, p.397-406.
2. T. Bakker (1968)
Ned. T. Natuurk., 34, sept/oct 1968, p.285.
3. T. Bakker (1972)
Symposiumverslag: Eigenschappen en toepassingen laserstraling; Delft, april 1972.
4. J.R. Biard (1967)
IEEE Transactions, Vol. ED-14 no.5, may 1967, p.233-238.
5. A.J. Hughes (1972)
IEEE Journal of Quantum Electronics vol.QE-8, no.12, dec. '72, p.909-910.
6. S.J. Lee (1969)
Physica, vol.45, p.379-385.
7. M.C. Teich (1968)
Proc. IEEE, vol.56, no.1 (jan. 1968), p.37-46.
8. J. Vriend (1972)
Rapport Ph.L.1972-22, Physisch Laboratorium TNO.

Voordracht gehouden op 5 juni 1973 tijdens de 230ste werkvergadering in het Delta-hotel te Vlaardingen.

UIT HET NERG

De leden wordt opmerkzaam gemaakt op de drie veranderingen van de tekst op de binnenkant van de omslag.

1. De reductie van 50% op de contributie kan ook aan anderen dan studenten worden verleend.
2. Toegevoegd is een paragraaf over auteursrechten.
3. Het hoofdstuk over de examens vermeldt de nieuwe titels van de twee examens; tevens wordt vermeld hoe men de brochures waarin de exameneisen en het examenreglement zijn opgenomen kan aanvragen.

INHOUD

Tijdschrift van het NERG Deel 38 - nr. 4 - 1973